



## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **11015814 A**(43) Date of publication of application: **22.01.99**

(51) Int. Cl.

**G06F 17/00**  
**G01R 29/08**  
**G06F 17/11**  
**G06F 17/50**

(21) Application number: **09170119**(22) Date of filing: **26.06.97**(71) Applicant: **FUJITSU LTD**

(72) Inventor: **OTSU SHINICHI**  
**MUKAI MAKOTO**

**(54) SIMULATION DEVICE AND METHOD USING**  
**MOMENT METHOD AND PROGRAM STORING**  
**MEDIUM**

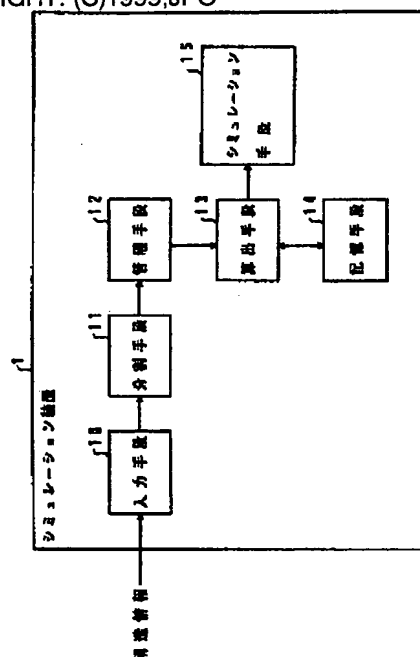
in accordance with the moment method by using the  
 calculated inter-element mutual impedance.

COPYRIGHT: (C)1999,JPO

## (57) Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To quickly execute simulation processing by a simulation device using a moment method for simulating a current allowed to flow into respective elements in an electronic equipment.

**SOLUTION:** The simulation device is provided with a means 11 for dividing an electronic equipment to be analyzed into plural elements, a means 13 for calculating mutual impedance among elements of the divided electronic equipment by using the approximate expression of mutual impedance between mono-poles expressed by a multinomial of k-th power derived by supposing the flow of a rectangular shape current into a mono-pole and approximating  $\exp(-jkr)$  by a multiplication expression between the Taylor expansions of  $\exp(-jkr_0)$  and  $\exp[-jk(r-r_0)]$  (provided that (j) is an imaginary number, (k) is a wave number, (r) is a distance between mono-poles, and  $r_0$  is a representative distance between mono-poles) and a means 15 for finding out a current allowed to flow into respective elements of the divided electronic equipment



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-15814

(43) 公開日 平成11年(1999) 1月22日

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>

識別記号

F I

G 0 6 F 17/00

G 0 6 F 15/20

D

G 0 1 R 29/08

G 0 1 R 29/08

Z

G 0 6 F 17/11

G 0 6 F 15/32

17/50

15/60

6 6 2 G

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 19 頁)

(21) 出願番号

特願平9-170119

(22) 出願日

平成9年(1997) 6月26日

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号

(72) 発明者 大津 信一

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号 富士通株式会社内

(72) 発明者 向井 誠

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号 富士通株式会社内

(74) 代理人 弁理士 岡田 光由 (外1名)

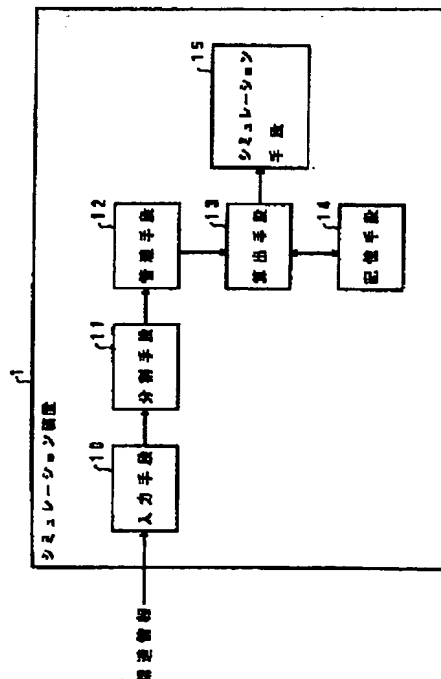
(54) 【発明の名称】 モーメント法を用いたシミュレーション装置及び方法並びにプログラム記憶媒体

(57) 【要約】

【課題】 本発明は、モーメント法を用いて電子機器の各要素に流れる電流をシミュレーションするモーメント法を用いたシミュレーション装置に関し、高速にシミュレーション処理を実行できるようにすることを目的とする。

【解決手段】 解析対象となる電子機器を要素に分割する手段11と、モノポールに三角形電流が流れることを想定し、更に、 $\exp(-jkr)$ を、 $\exp(-jkr_0)$ と $\exp[-jk(r-r_0)]$ のテイラー展開式との乗算式で近似( $j$ は虚数、 $k$ は波数、 $r$ はモノポール間の距離、 $r_0$ はモノポール間の代表距離)することで導出される、 $k$ の巾乗の多項式で表されるモノポール間の相互インピーダンスの近似式を使って、分割された電子機器の要素間の相互インピーダンスを算出する手段13と、算出された要素間の相互インピーダンスを使い、モーメント法に従って、分割された電子機器の各要素に流れる電流を求める手段15とを備えるように構成する。

本発明の回路構成図



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 リアクションマッチングによるモーメント法を用いて、電子機器の各要素に流れる電流をシミュレーションするモーメント法を用いたシミュレーション装置において、

解析対象となる電子機器の構造情報に従って、該電子機器を要素に分割する分割手段と、

モノポールに三角形電流が流れることを想定し、更に、 $\exp(-jkr)$ を、 $\exp(-jkr_0)$ と $\exp[-jk(r-r_0)]$ のテイラー展開式との乗算式で近似（但し、 $j$ は虚数、 $k$ は波数、 $r$ はモノポール間の距離、 $r_0$ はモノポール間の代表距離）することで導出される、 $k$ の巾乗の多項式で表されるモノポール間の相互インピーダンスの近似式を使って、上記分割手段の分割する電子機器の要素間の相互インピーダンスを算出する算出手段と、

上記算出手段の算出する要素間の相互インピーダンスを使い、モーメント法に従って、上記分割手段の分割する電子機器の各要素に流れる電流を求めるシミュレーション手段とを備えることを、  
特徴とするモーメント法を用いたシミュレーション装置。

【請求項2】 請求項1記載のモーメント法を用いたシミュレーション装置において、  
算出手段は、解析的手法に従って、要素間の相互インピーダンスを算出することを、  
特徴とするモーメント法を用いたシミュレーション装置。

【請求項3】 請求項1又は2記載のモーメント法を用いたシミュレーション装置において、  
算出手段は、 $k$ の巾乗の多項式で表されるモノポール間の相互インピーダンスの近似式に対して、虚数部を持つ $k$ を代入することで、損失のある空間での要素間の相互インピーダンスを算出することを、  
特徴とするモーメント法を用いたシミュレーション装置。

【請求項4】 請求項1ないし3記載のモーメント法を用いたシミュレーション装置において、  
算出手段は、2つのモノポールが平行のときに用いる算出処理手順と、2つのモノポールが直交するときに用いる算出処理手順と、2つのモノポールが非平行かつ非直交するときに用いる算出処理手順とを別々に用意して、それらの内の2つのモノポールのなす角度に応じた算出処理手順を用いて、要素間の相互インピーダンスを算出することを、  
特徴とするモーメント法を用いたシミュレーション装置。

【請求項5】 請求項1ないし4記載のモーメント法を用いたシミュレーション装置において、  
算出手段は、 $\exp[-jk(r-r_0)]$ のテイラー

展開式の展開レベルが異なる算出処理手順を複数用意して、それらの内のモノポールの長さに応じた算出処理手順を用いて、要素間の相互インピーダンスを算出することを、

特徴とするモーメント法を用いたシミュレーション装置。

【請求項6】 請求項1ないし5記載のモーメント法を用いたシミュレーション装置において、

算出手段により算出される指定周波数での要素間の相互インピーダンスの近似式が持つ $k$ の巾乗の係数値を記憶する記憶手段を備え、

算出手段は、上記記憶手段の記憶する係数値を使って、上記指定周波数以外の周波数での要素間の相互インピーダンスを算出することを、

特徴とするモーメント法を用いたシミュレーション装置。

【請求項7】 請求項1ないし5記載のモーメント法を用いたシミュレーション装置において、

算出手段により算出される指定周波数での要素間の相互インピーダンスの近似式が持つ $k$ の巾乗の係数値の2重積分値を記憶する記憶手段を備え、

算出手段は、上記記憶手段の記憶する係数値の2重積分値を使って、上記指定周波数以外の周波数での要素間の相互インピーダンスを算出することを、

特徴とするモーメント法を用いたシミュレーション装置。

【請求項8】 リアクションマッチングによるモーメント法を用いて、電子機器の各要素に流れる電流をシミュレーションするモーメント法を用いたシミュレーション方法において、

解析対象となる電子機器の構造情報に従って、該電子機器を要素に分割する第1の処理過程と、

モノポールに三角形電流が流れることを想定し、更に、 $\exp(-jkr)$ を、 $\exp(-jkr_0)$ と $\exp[-jk(r-r_0)]$ のテイラー展開式との乗算式で近似（但し、 $j$ は虚数、 $k$ は波数、 $r$ はモノポール間の距離、 $r_0$ はモノポール間の代表距離）することで導出される、 $k$ の巾乗の多項式で表されるモノポール間の相互インピーダンスの近似式を使って、第1の処理過程で分割する電子機器の要素間の相互インピーダンスを算出する第2の処理過程と、

第2の処理過程で算出する要素間の相互インピーダンスを使い、モーメント法に従って、第1の処理過程で分割する電子機器の各要素に流れる電流を求める第3の処理過程とを備えることを、

特徴とするモーメント法を用いたシミュレーション方法。

【請求項9】 リアクションマッチングによるモーメント法を用いて、電子機器の各要素に流れる電流をシミュレーションするモーメント法を用いたシミュレーション

装置の実現に用いられるプログラムが記憶されるプログラム記憶媒体であって、  
解析対象となる電子機器の構造情報に従って、該電子機器を要素に分割する分割手段と、  
モノポールに三角形電流が流れることを想定し、更に、 $\exp(-jkr)$ を、 $\exp(-jkr_0)$ と $\exp[-jk(r-r_0)]$ のテイラー展開式との乗算式で近似（但し、 $j$ は虚数、 $k$ は波数、 $r$ はモノポール間の距離、 $r_0$ はモノポール間の代表距離）することで導出される、 $k$ の巾乗の多項式で表されるモノポール間の相互インピーダンスの近似式を使って、上記分割手段の分割する電子機器の要素間の相互インピーダンスを算出する算出手段と、  
上記算出手段の算出する要素間の相互インピーダンスを使い、モーメント法に従って、上記分割手段の分割する電子機器の各要素に流れる電流を求めるシミュレーション手段とを実現するプログラムが記憶されることを、  
特徴とするプログラム記憶媒体。

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、モーメント法を用いて電子機器の各要素に流れる電流をシミュレーションするモーメント法を用いたシミュレーション装置及び方法と、そのシミュレーション装置を実現するプログラムが記憶されるプログラム記憶媒体とに関し、特に、高速にシミュレーション処理を実行するモーメント法を用いたシミュレーション装置及び方法と、そのシミュレーション装置を実現するプログラムが記憶されるプログラム記憶媒体とに関する。

【0002】電子機器に対する社会的規制として、一定のレベル以上の不要な電波やノイズを放射してはならないということがあり、各国の規格で厳しく規制されるようになってきた。電子機器の発生する電波を定量的にシミュレーションするには、プリント板が発生する電波だけでなく、ケーブルに流れるコモンモード電流による電波放射や、筐体のシールド効果などを計算する必要がある。

【0003】このようなことを背景にして、本発明者らは、モーメント法を用いて電子機器の各要素に流れる電流を算出し、それを使って電子機器の放射する電波を算出するシミュレーション技術の発明を開示してきた。このシミュレーション技術を実用的なものとするためには、一層の高速処理を実現する構成を構築していく必要がある。

##### 【0004】

【従来の技術】物体の放射する電磁界強度は、物体各部に流れる電流や磁流を求めて、それを公知の電磁波放射の理論式に代入することでシミュレーションできる。この物体各部に流れる電流や磁流は、理論的には、マックスウェルの電磁波方程式を与えられた境界条件の下に解

くことで得られる。

【0005】これを解くものとしてモーメント法がある。モーメント法は、マックスウェルの電磁波方程式から導かれる積分方程式の解法の1つで、物体を小さな要素に分割して電流や磁流の計算を行う手法であり、3次元の任意形状物体を扱うことができる。このモーメント法についての参考文献としては、「H.N.Wang, J.H.Richmond and M.C.Gilreath: "Sinusoidal reaction formulation for radiation and scattering from conducting surface" IEEE TRANSACTIONS ANTENNAS PROPAGATION vol. AP-23 1975」がある。

【0006】モーメント法では、シミュレーション対象となる電子機器の構造を各要素に区分し、処理対象の周波数を選択すると、その周波数について、区分した要素間の相互インピーダンス（相互アドミッタンスや相互リアクションを考慮する場合には、それらについても求める）を所定の計算処理によって求めて、その求めた相互インピーダンスと構造情報で指定される波源とをモーメント法の連立方程式に代入し、それを解くことで各要素に流れる電流（相互アドミッタンスや相互リアクションを考慮する場合には、磁流についても求める）を求めることになる。

【0007】すなわち、区分した要素間の相互インピーダンス $Z_{ij}$ を求め、この相互インピーダンス $Z_{ij}$ と、波源 $V_i$ と、区分した要素に流れる電流 $I_i$ との間に成立するモーメント法の連立方程式

$$[Z_{ij}] [I_i] = [V_i]$$

を解くことで、区分した各要素に流れる電流 $I_i$ を求めることになる。

【0008】モーメント法で必要となる要素間の相互インピーダンス $Z_{ij}$ は、モノポールを使って導出することになる。この相互インピーダンス $Z_{ij}$ の導出について説明するために、図8に示すようなモノポールを考える。図中、太線はモノポールを示し、モノポール①とモノポール②とは1つの直線上に配置され、モノポール③とモノポール④とは1つの直線上に配置される。このモノポール①②とモノポール③④との間の距離を $h$ 、モノポール①②とモノポール③④とのなす角度を $\phi$ とする。

【0009】このとき、モノポール①②の任意の位置 $z$ と、モノポール③④の任意の位置 $t$ と、モノポール①②とモノポール③④との間の距離 $h$ と、モノポール①②とモノポール③④とのなす角度を $\phi$ との間には、 $r = (z^2 + t^2 - 2zt \cos \phi + h^2)^{1/2}$ という関係式が成立する。

【0010】相互インピーダンス $Z_{ij}$ の一般式は、図9に図示する数式で表される。ここで、 $\omega$ は角周波数、 $r$ はモノポール間の距離、 $\rho_1 = (-1/j\omega) \times (\partial J_1 / \partial t)$ 、 $\rho_2 = (-1/j\omega) \times (\partial J_2 / \partial t)$ である。また、積分範囲として $s$ を用いているのは、モノポールの形状が線状（ワイヤ）である場合に限らず、

モノポールの形状が面状（サーフェイパッチ）である場合も考慮しているからである。

【0011】 $J_1$  及び  $J_2$  は、モーメント法における展開関数であり、モノポール上の電流分布の形状を表す。従来技術では、この展開関数として、正弦波状電流を想\*

電流モノポール①  $J_1 = \text{sink}(z - z_0) / \text{sink} d_1$

電流モノポール②  $J_1 = \text{sink}(z_2 - z) / \text{sink} d_2$

電流モノポール③  $J_2 = \text{sink}(t - t_0) / \text{sink} d_3$

電流モノポール④  $J_2 = \text{sink}(t_2 - t) / \text{sink} d_4$

但し、 $k$  : 波数

$d_1$  : モノポール①の長さ  $d_2$  : モノポール②の長さ

$d_3$  : モノポール③の長さ  $d_4$  : モノポール④の長さ

を想定している。

【0013】これから、これらの展開関数を用いて、モノポール①とモノポール③との間の相互インピーダンス  $Z_{13}$  と、モノポール①とモノポール④との間の相互インピーダンス  $Z_{14}$  と、モノポール②とモノポール③との間の相互インピーダンス  $Z_{23}$  と、モノポール②とモノポール④との間の相互インピーダンス  $Z_{24}$  とは、

$$Z_{13} = [j\omega\mu / (4\pi \text{sink} d_1 \text{sink} d_3)] \times \int \int [\text{sink}(z - z_0) \text{sink}(t - t_0) \cos\phi - \cos k(z - z_0) \cos k(t - t_0)] \times \exp(-jkr) / r \cdot dz dt$$

但し、 $\int \int$  :  $t_0$  から  $t_1$  までと  $z_0$  から  $z_1$  までの積分

$$Z_{14} = [j\omega\mu / (4\pi \text{sink} d_1 \text{sink} d_4)] \times \int \int [\text{sink}(z - z_0) \text{sink}(t_2 - t) \cos\phi + \cos k(z - z_0) \cos k(t_2 - t)] \times \exp(-jkr) / r \cdot dz dt$$

但し、 $\int \int$  :  $t_1$  から  $t_2$  までと  $z_0$  から  $z_1$  までの積分

$$Z_{23} = [j\omega\mu / (4\pi \text{sink} d_2 \text{sink} d_3)] \times \int \int [\text{sink}(z_2 - z) \text{sink}(t - t_0) \cos\phi - \cos k(z_2 - z) \cos k(t - t_0)] \times \exp(-jkr) / r \cdot dz dt$$

但し、 $\int \int$  :  $t_0$  から  $t_1$  までと  $z_1$  から  $z_2$  までの積分

$$Z_{24} = [j\omega\mu / (4\pi \text{sink} d_2 \text{sink} d_4)] \times \int \int [\text{sink}(z_2 - z) \text{sink}(t_2 - t) \cos\phi + \cos k(z_2 - z) \cos k(t_2 - t)] \times \exp(-jkr) / r \cdot dz dt$$

但し、 $\int \int$  :  $t_1$  から  $t_2$  までと  $z_1$  から  $z_2$  までの積分

と求まる。

【0014】これらのモノポール間の相互インピーダンスを用いて、ワイヤ間の相互インピーダンス  $Z_w$  は、

$$Z_w = Z_{13} + Z_{14} + Z_{23} + Z_{24}$$

と求まることになる。また、サーフェイパッチ間の相互インピーダンス  $Z_s$  は、図10に示すように、ワイヤ間の相互インピーダンス  $Z_w$  を2重積分することで求まることになる。

【0015】この従来技術には、次のような長所がある。すなわち、モノポール間相互インピーダンスの式から明らかなように、「 $Z_{11} = Z_{11}$ 」が成立し、これによ

\*定して相互インピーダンス  $Z_{11}$  を算出する構成を採っている。

【0012】すなわち、従来技術では、モノポール①～④の展開関数として、

り、モーメント法の連立方程式が対称の形をとる。これから、計算すべきインピーダンスの数が少なくなるとともに、連立方程式の計算が速くできる。

【0016】また、展開関数が正弦波状で、リアクションマッチング（各モノポール上の全範囲を積分するので、未知数の数（区分した要素の数）が少なくとも高精度の計算が可能になる。これに対して、展開関数がパルス状で、ポイントマッチング（片方のモノポールは1点のみの計算となる。そのため積分は1重積分となる）を採用すると、精度を出すためにより多くの未知数を必要とする。

【0017】モーメント法の連立方程式を解く時間は、未知数の3乗に比例するので、展開関数が正弦波状で、リアクションマッチングを採用すると、未知数が少なく済み、大規模なモデルを解析するのに大変有利となる。

【0018】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上述したモノポール間相互インピーダンス  $Z_{13}$ 、 $Z_{14}$ 、 $Z_{23}$ 、 $Z_{24}$  は、初等関数で計算できるものとなっていない。

【0019】これから、従来では、このモノポール間相互インピーダンスを複数個の指数積分に展開して、それらの指数積分を公式の規定する数値計算手法により計算していくことで、このモノポール間相互インピーダンスを計算していくという方法を探っていた。ここで、このとき展開する指数積分の個数としては、2つのモノポールが平行な場合（ $\cos\phi = 1$ ）には8個、2つのモノポールが交差する場合（ $\cos\phi \neq 1$ ）には20個となる。

【0020】しかるに、指数積分の数値計算手法は繰り返し計算が主体となるもので、1つの指数積分の計算でさえ時間がかかり、2つのモノポールが平行な場合にはその8倍、2つのモノポールが交差する場合（この場合には、更に積分範囲が複素数となる）にはその20倍と、非常に長い計算時間が必要となる。

【0021】しかも、サーフェイパッチ間のインピーダンスについては、ワイヤ間のインピーダンスを2重積

分するため、更に長い計算時間が必要となる。これから、従来技術に従っていると、モーメント法を用いて電子機器の各要素に流れる電流をシミュレーションするときに、非常に長い処理時間が必要になるという問題点があった。

【0022】この従来技術について、上述した

$$Z_{13} = [j\omega \mu / (4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_3)] \times \int \int [\text{sink}(z-z_0) \text{sink}(t-t_0) \cos \phi - \cos k(z-z_0) \cos k(t-t_0)] \times \exp(-jkr) / r \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$  :  $t_0$  から  $t_1$  までと  $z_0$  から  $z_1$  までの積分

に従って具体的に説明するならば、2つのモノポールが平行な場合 ( $\cos \phi = 1$ ) には、この式を8個の指数積分に展開することで、

$$Z_{13} = [j\omega \mu / (4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_3)] \times [\sum \alpha_n \int \exp(-jku) / u \cdot du]$$

但し、 $\alpha_n$  は複素数の定数

$\Sigma$  は  $n=1 \sim 8$  について加算

$\int$  は  $a_{0n}$  (実数) から  $a_{1n}$  (実数) までの積分を得る。

【0023】また、2つのモノポールが交差する場合 ( $\cos \phi \neq 1$ ) には、この式を20個の指数積分に展開することで、

$$Z_{13} = [j\omega \mu / (4\pi \text{sinkd}_1 \text{sinkd}_3)] \times [\sum \alpha_n \int \exp(-jku) / u \cdot du + \sum \beta_n \int \exp(-jku) / u \cdot du]$$

但し、 $\alpha_n$ ,  $\beta_n$  は複素数の定数

前項の  $\Sigma$  は  $n=1 \sim 4$  について加算

後項の  $\Sigma$  は  $n=1 \sim 16$  について加算

前項の  $\int$  は  $a_{0n}$  (実数) から  $a_{1n}$  (実数) までの積分

後項の  $\int$  は  $c_{0n}$  (複素数) から  $c_{1n}$  (複素数) までの積分を得る。

【0024】そして、「 $t = jku$ 」と置き換えることで、これらの指数積分「 $\int \exp(-jku) / u \cdot du$ 」を、

$$\int_{c_{0n}}^{c_{1n}} \exp(-jkr) / u \cdot du = \int_{jkc_{0n}}^{jkc_{1n}} \exp(-t) / t \cdot dt = \int_{jkc_{0n}}^{jkc_{1n}} \exp(-t) / t \cdot dt - \int_{jkc_{0n}}^{jkc_{0n}} \exp(-t) / t \cdot dt$$

但し、 $\int_{jkc_{1n}}$  は  $\infty$  から  $jkc_{1n}$  までの積分

$\int_{jkc_{0n}}$  は  $\infty$  から  $jkc_{0n}$  までの積分

のように変形する。

【0025】そして、この各項を、下記の公式に従って、

$$\int \exp(-t) / t \cdot dt = \gamma + \log t + \sum [(-1)^n t^n / (n! n)]$$

但し、 $\int$  は  $\infty$  から指定値までの積分

$\gamma$  はオイラー定数

$\Sigma$  は  $n=1 \sim \infty$  について加算

必要な精度が得られるまで繰り返し計算を行う。通常、 $n=10 \sim 20$  程度の繰り返し計算を行うことになる。

【0026】このように、従来技術に従っていると、モノポール間相互インピーダンスの算出に、非常に長い処理時間が必要になるという問題点があり、これにより、モーメント法を用いて電子機器の各要素に流れる電流をシミュレーションするときに、非常に長い処理時間が必要になるという問題点があった。

【0027】本発明はかかる事情に鑑みてなされたものであって、モーメント法を用いて電子機器の各要素に流れる電流をシミュレーションする構成を採るときにあつて、高速にシミュレーション処理を実行できるようにする新たなモーメント法を用いたシミュレーション装置及び方法の提供と、そのシミュレーション装置を実現するプログラムが記憶される新たなプログラム記憶媒体の提供とを目的とする。

【0028】

【課題を解決するための手段】図1に本発明の原理構成を図示する。図中、1は本発明を具備するシミュレーション装置であつて、電子機器を要素に分割し、周波数が与えられるときに、要素間の相互インピーダンスを算出して、それらと要素の持つ波源とから、リアクションマッチングによるモーメント法に従って各要素に流れる電流をシミュレーションするものである。

【0029】本発明のシミュレーション装置1は、入力手段10と、分割手段11と、管理手段12と、算出手段13と、記憶手段14と、シミュレーション手段15とを備える。

【0030】この入力手段10は、解析対象となる電子機器の構造情報を入力する。分割手段11は、入力手段10の入力する構造情報に従って、解析対象となる電子機器を要素に分割する。管理手段12は、分割手段11の出力する分割情報を格納する。

【0031】算出手段13は、モノポールに三角形状電流が流れることを想定し、更に、 $\exp[-jkr]$  を、 $\exp[-jkr_0]$  と、 $\exp[-jk(r-r_0)]$  のテイラー展開式との乗算式で近似することで導出される、 $k$  の巾乗の多項式で表されるモノポール間の相互インピーダンスの近似式を使い、分割手段11の分割する電子機器の要素間の相互インピーダンスを算出する。ここで、 $j$  は虚数、 $k$  は波数、 $r$  はモノポール間の距離、 $r_0$  はモノポール間の代表距離である。

【0032】この算出手段13は、2つのモノポールが平行のときに用いる算出処理手順と、2つのモノポールが直交するときに用いる算出処理手順と、2つのモノポールが非平行かつ非直交するときに用いる算出処理手順とを別々に用意して、それらの内の2つのモノポールのなす角度に応じた算出処理手順を用いて、要素間の相互インピーダンスを算出することがある。

【0033】また、この算出手段13は、 $\exp[-jk(r-r_0)]$  のテイラー展開式の展開レベルが異なる算出処理手順を複数用意して、それらの内のモノポー

ルの長さに応じた算出処理手順を用いて、要素間の相互インピーダンスを算出することがある。

【0034】記憶手段14は、ワイヤ間については、算出手段13により算出される指定周波数での要素間の相互インピーダンスの近似式を持つkの巾乗の係数値を記憶し、サーフェイパッチ間については、その係数値の2重積分値を記憶する。

【0035】算出手段13は、この記憶手段14が備えられるときには、記憶手段14の記憶する係数値を使って、指定される周波数での1次元的な広がりを持つワイヤ要素間の相互インピーダンスを算出したり、記憶手段14の記憶する係数値の2重積分値を使って、指定される周波数での2次元的な広がりを持つサーフェイパッチ要素間の相互インピーダンスを算出する。

【0036】シミュレーション手段15は、算出手段13の算出する要素間の相互インピーダンスを使い、モーメント法に従って、分割手段11の分割する電子機器の各要素に流れる電流を求める。

【0037】ここで、本発明のシミュレーション装置1の持つシミュレーション機能は具体的にはプログラムで実現されるものであり、このプログラムは媒体から提供され、データ処理装置にインストールされてメモリ上で動作することで、本発明のシミュレーション装置1を実現することになる。

【0038】このように構成される本発明のシミュレーション装置1では、算出手段13がモノポールに正弦波状電流を良く近似する三角形状電流が流れることを想定する。例えば、図8に示したモノポール①とモノポール③の展開関数として、従来技術では、

$$\text{電流モノポール① } J_1 = \sin k(z - z_0) / \sin kd_1$$

$$\text{電流モノポール③ } J_2 = \sin k(t - t_0) / \sin kd_3$$

を想定するのに対して、本発明では、

$$\text{電流モノポール① } J_1 = (z - z_0) / d_1$$

$$\text{電流モノポール③ } J_2 = (t - t_0) / d_3$$

を想定する。

【0039】これから、従来技術では、モノポール①とモノポール③との間の相互インピーダンス $Z_{13}$ は、

$$Z_{13} = [j\omega\mu / (4\pi \sin kd_1 \sin kd_3)] \times \iint [\sin k(z - z_0) \sin k(t - t_0) \cos \phi - \cos k(z - z_0) \cos k(t - t_0)] \times \exp(-jkr) / r \cdot dz dt$$

但し、 $\iint$  :  $t_0$  から  $t_1$  までと  $z_0$  から  $z_1$  までの積分

となるのに対して、本発明では、

$$Z_{13} = [j\omega\mu / (4\pi d_1 d_3)] \times \iint [(z - z_0)(t - t_0) \cos \phi - (1/k^2)] \exp(-jkr) / r \cdot dz dt$$

但し、 $\iint$  は  $t_0$  から  $t_1$  までと  $z_0$  から  $z_1$  までの積分

となる。

【0040】更に、算出手段13は、この式に含まれる  $\exp(-jkr)$  を、 $\exp(-jkr_0)$  と、 $\exp[-jk(r - r_0)]$  のテイラー展開式との乗算式で近似する。ここで、jは虚数、kは波数、rはモノポール間の距離、 $r_0$  はモノポール間の代表距離である。

【0041】すなわち、 $\exp(-jkr)$  を、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0) [1 - jk(r - r_0)]$$

のように近似したり、それよりも高精度となる

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0) [1 - jk(r - r_0) - k^2(r - r_0)^2/2]$$

のように近似したり、それよりも高精度となる

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0) [1 - jk(r - r_0) - k^2(r - r_0)^2/2 + jk^3(r - r_0)^3/6]$$

のように近似する。

【0042】このように、算出手段13は、モノポールに三角形状関数の電流が流れることを想定し、更に、 $\exp(-jkr)$  を、 $\exp(-jkr_0)$  と、 $\exp[-jk(r - r_0)]$  のテイラー展開式との乗算式で近似する構成を採り、これにより、

$$Z = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_2 k^2 + a_4 k^4 + \dots) + j(a_{-1}/k + a_1 k + a_3 k^3 + \dots)]$$

の関数（以下、この式を〔数1〕式と称する）で表されるモノポール間の相互インピーダンスZを導出する。このとき導出されるモノポール間の相互インピーダンスZの係数値 $a_1$ は、実施例で示すように初等関数で計算できるという特徴がある。

【0043】これから、算出手段13は、〔数1〕式で示されるkの巾乗の多項式で表されるモノポール間の相互インピーダンスの近似式を使い、解析的手法に従って、分割手段11の分割する電子機器の要素間の相互インピーダンスを算出する。すなわち、ワイヤ間の相互インピーダンスについては、モノポール間の相互インピーダンスを加算していくことで算出し、サーフェイパッチ間の相互インピーダンスについては、モノポール間の相互インピーダンスを2重積分していくことで算出するのである。

【0044】この算出手段13の算出処理を受けて、シミュレーション手段15は、算出手段13の算出する要素間の相互インピーダンスを使い、モーメント法に従って、分割手段11の分割する電子機器の各要素に流れる電流を求める。

【0045】このようにして、本発明のシミュレーション装置1によれば、電子機器を要素に分割し、周波数が与えられるときに、要素間の相互インピーダンスを算出して、それらと要素の持つ波源とからモーメント法に従って各要素に流れる電流をシミュレーションする構成を採るときにあつて、要素間の相互インピーダンスを初等関数により高速に算出できるようになることから、各要素に流れる電流を高速にシミュレーションできるようになる。

【0046】この構成を採るときにあつて、算出手段1



3は、〔数1〕式で示される $k$ の巾乗の多項式で表されるモノポール間の相互インピーダンスの近似式に対して、虚数部を持つ $k$ を代入することで、損失のある空間での要素間の相互インピーダンスを算出していくことがある。これにより、損失のある空間での要素間の相互インピーダンスを極めて簡単に求めることができるようになる。

【0047】また、算出手段13は、モノポール①とモノポール③との間の相互インピーダンス $Z_{13}$ が、  

$$Z_{13} = [j\omega\mu / (4\pi d_1 d_3)] \times \int \int [(z-z_0)(t-t_0)\cos\phi - (1/k^2)] \exp(-jkr) / r \cdot dzdt$$

で示されることから分かるように、2つのモノポールが平行な場合( $\cos\phi=1$ )と、2つのモノポールが直交する場合( $\cos\phi=0$ )では、2つのモノポールが非平行かつ非直交する場合( $\cos\phi \neq 1, 0$ )に比べて、〔数1〕式の係数値 $a_i$ が簡単に求まるということを考慮して、2つのモノポールが平行なときに用いる算出処理手順と、2つのモノポールが直交するときに用いる算出処理手順と、2つのモノポールが非平行かつ非直交するときに用いる算出処理手順とを別々に用意して、それらの内の2つのモノポールのなす角度に応じた算出処理手順を用いて、要素間の相互インピーダンスを算出していくことがある。

【0048】また、算出手段13は、モノポールの長さが短いときには、 $\exp[-jk(r-r_0)]$ のテイラー展開式の展開レベルが小さくても精度が保証でき、モノポールの長さが長くなるに従って、 $\exp[-jk(r-r_0)]$ のテイラー展開式の展開レベルを大きくしなければ精度が保証できないということを考慮して、 $\exp[-jk(r-r_0)]$ のテイラー展開式の展開レベルが異なる算出処理手順を複数用意して、それらの内のモノポールの長さに応じた算出処理手順を用いて、要素間の相互インピーダンスを算出していくことがある。

【0049】また、記憶手段14は、算出手段13により算出される〔数1〕式の係数値 $a_i$ を記憶し、これを受けて、算出手段13は、その記憶される係数値 $a_i$ を使って、指定される周波数(係数値 $a_i$ の算出の際に用いた周波数とは異なるもの)での、ワイヤ間の相互インピーダンスを算出していくことがある。

【0050】また、記憶手段14は、算出手段13により算出される〔数1〕式の係数値 $a_i$ の2重積分値を記憶し、これを受けて、算出手段13は、その記憶される係数値 $a_i$ の2重積分値を使って、指定される周波数(係数値 $a_i$ の算出の際に用いた周波数とは異なるもの)での、サーフェイスパッチ間の相互インピーダンスを算出していくことがある。

【0051】このようにして、本発明のシミュレーション装置1によれば、電子機器を要素に分割し、周波数が与えられるときに、要素間の相互インピーダンスを算出

して、それらと要素の持つ波源とからモーメント法に従って各要素に流れる電流をシミュレーションする構成を採るときにあって、要素間の相互インピーダンスを初等関数により高速に算出できるようになることから、各要素に流れる電流を高速にシミュレーションできるようになる。

【0052】しかも、要素間の相互インピーダンスの対称性とリアクションマッチングとを保持しつつ、要素間の相互インピーダンスを算出する構成を採ることから、従来技術の持つ特徴を保持しつつ、各要素に流れる電流を高速にシミュレーションできるようになる。

【0053】

【発明の実施の形態】以下、実施の形態に従って本発明を詳細に説明する。図2に、本発明を具備する電磁界強度算出装置20の一実施例を図示する。

【0054】この電磁界強度算出装置20は、メッシュ化ルーチン210/相互インピーダンス算出ルーチン211/モーメント法解法ルーチン212/電磁界強度算出ルーチン213を持つ電磁界強度算出プログラム21を展開する構成を採って、モーメント法を使って、解析対象となる電子機器から放射される電磁界強度をシミュレーションする処理を実行する。図中に示す入力データファイル30は、解析対象となる電子機器の構造情報を格納するもの、出力データファイル40は、シミュレーション結果の電磁界強度を格納するものである。

【0055】ここで、この電磁界強度算出プログラム21は媒体から提供され、データ処理装置にインストールされてメモリ上で動作することで、本発明の電磁界強度算出装置1を実現することになる。

【0056】図3に、電磁界強度算出プログラム21の実行する処理フローの一実施例を図示する。この処理フローに示すように、電磁界強度算出プログラム21は、起動されると、先ず最初に、ステップ1で、入力データファイル30から、解析対象となる電子機器の構造情報を読み込み、続くステップ2で、メッシュ化ルーチン210を呼び出して、この読み込んだ構造情報に基づいて、解析対象の電子機器をメッシュに分割してモーメント法を適用するためのモデルを生成する。

【0057】続いて、ステップ3で、処理対象となる周波数の中から未処理のものを1つ選択し、続くステップ4で、全周波数の選択を完了したのか否かを判断して、全周波数の選択を完了したことを判断するときには、処理を終了する。

【0058】一方、全周波数の選択を完了していないことを判断するとき、すなわち、ステップ3で周波数を選択できたことを判断するときには、ステップ5に進んで、相互インピーダンス算出ルーチン211を呼び出して、メッシュ化された要素間の相互インピーダンス $Z_{ij}$ ( $i=1 \sim n, j=1 \sim n$ )を算出する。

【0059】続いて、ステップ6で、モーメント法解法ル

ーチン212を呼び出して、ステップ5で算出した相互インピーダンス $Z_{ij}$ と、構造情報で指定される波源の電圧値 $V_i$ とを使い、モーメント法の連立方程式

$$[Z_{ij}] [I_i] = [V_i]$$

を解くことで、メッシュ化された各要素に流れる電流 $I_i$ を算出する。

【0060】続いて、ステップ7で、予め指定される観測点の中から未処理のものを1つ選択し、続くステップ8で、全観測点の選択を完了したのか否かを判断して、全観測点の選択を完了したことを判断するときには、次の周波数を処理すべくステップ3に戻っていく。

【0061】一方、全観測点の選択を完了していないことを判断するとき、すなわち、ステップ8で観測点を選択できたことを判断するときには、ステップ9に進んで、電磁界強度算出ルーチン213を呼び出して、ステップ6で算出したメッシュ化された各要素に流れる電流 $I_i$ が、ステップ7で選択した観測点にもたらす電磁界強度を算出して、その算出結果を出力データファイル4\*

(1) 相互インピーダンス $Z_{11}$

$$J_1 = (z - z_0) / d_1$$

(2) 相互インピーダンス $Z_{00}$

$$J_1 = (-z + z_1) / d_1$$

(3) 相互インピーダンス $Z_{01}$

$$J_1 = (-z + z_1) / d_1$$

(4) 相互インピーダンス $Z_{10}$

$$J_1 = (z - z_0) / d_1$$

という4種類になる。ここで、 $d_1$ はモノポールXの長さ、 $d_2$ はモノポールYの長さである。

【0066】これから、この相互インピーダンス $Z_{11}$ について説明するならば、

$$J_1 = (z - z_0) / d_1, J_2 = (t - t_0) / d_2$$

を、図9に図示する相互インピーダンス $Z_{11}$ の一般式に代入することで、

$$Z_{11} = [j\omega\mu / (4\pi d_1 d_2)] \times \int \int [(z - z_0)(t - t_0) \cos \phi - (1/k^2)] \exp(-jkr) / r \cdot dz dt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分を得る。

【0067】一方、相互インピーダンス算出ルーチン211は、このモノポール間の相互インピーダンスの算出にあたって必要となる $\exp(-jkr)$ を、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jk r_0) [1 - jk(r - r_0)]$$

のように近似（以下、この近似を近似ケース1と称する）したり、それよりも高精度となる

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jk r_0) [1 - jk(r - r_0) - k^2(r - r_0)^2/2]$$

のように近似（以下、この近似を近似ケース2と称する）したり、それよりも高精度となる

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jk r_0) [1 - jk(r - r_0) - k^2(r - r_0)^2/2 + jk^3(r - r_0)^3/6]$$

のように近似（以下、この近似を近似ケース3と称する）する。

\*0に格納してから、次の観測点を処理すべくステップ7に戻っていく。

【0062】このようにして、電磁界強度算出プログラム21は、モーメント法を使って、解析対象となる電子機器から放射される電磁界強度をシミュレーションする処理を実行するのである。

【0063】次に、相互インピーダンス算出ルーチン211の実行する相互インピーダンスの算出処理について説明する。相互インピーダンス算出ルーチン211は、モノポール間の相互インピーダンスを算出することで、メッシュ化された要素間の相互インピーダンスを算出する。

【0064】このモノポール間の相互インピーダンスの算出にあたって、相互インピーダンス算出ルーチン211は、モノポールに三角形関数の電流が流れることを想定する。

【0065】これから、算出する必要があるモノポール間の相互インピーダンスは、図4に示すように、

$$J_1 = (z - z_0) / d_1, J_2 = (t - t_0) / d_2$$

$$J_1 = (-z + z_1) / d_1, J_2 = (-t + t_1) / d_2$$

$$J_1 = (-z + z_1) / d_1, J_2 = (t - t_0) / d_2$$

$$J_1 = (z - z_0) / d_1, J_2 = (-t + t_1) / d_2$$

【0068】ここで、 $r_0$ はモノポール間の代表距離であり、図8で説明したように、モノポールXの任意の位置 $z$ と、モノポールYの任意の位置 $t$ と、モノポールXとモノポールYとの間の距離 $h$ と、モノポールXとモノポールYとのなす角度を $\phi$ との間には、

$$r = (z^2 + t^2 - 2zt \cos \phi + h^2)^{1/2}$$

という関係式が成立することから、例えば、モノポール間の代表距離 $r_0$ として、モノポールXの midpoint とモノポールYの midpoint との間の距離を定義する場合には、このモノポール間の代表距離 $r_0$ は、

$$r_0 = [(z_1 + z_0)^2/4 + (t_1 + t_0)^2/4 - \cos \phi (z_1 + z_0)(t_1 + t_0)/2 + h^2]^{1/2}$$

となる。

【0069】これから、近似ケース1に従う場合には、

$$Z_{11} = [j\omega\mu / (4\pi d_1 d_2)] \times \int \int [(z - z_0)(t - t_0) \cos \phi - (1/k^2)] \exp(-jkr) / r \cdot dz dt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分に、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jk r_0) [1 - jk(r - r_0)]$$

を代入することで、

$$Z_{11} = [(\mu / \epsilon)^{1/2} / (4\pi d_1 d_2)] \exp(-jk r_0) \times \int \int [-1 + (r_0/r) + k^2((z - z_0)(t - t_0) - (z - z_0)(t - t_0)r_0/r) \cos \phi - j/(kr) + jk \cos \phi (z - z_0)(t - t_0)/r] \cdot dz dt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積

分を得る。

【0070】また、近似ケース2に従う場合には、  

$$Z_{11} = [j\omega\mu/(4\pi d_1 d_2)] \times \int \int [(z-z_0)(t-t_0)\cos\phi - (1/k^2)] \exp(-jkr)/r \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分に、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0) [1 - jk(r-r_0) - k^2(r-r_0)^2/2]$$

を代入することで、

$$Z_{11} = [(\mu/\epsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [-1 + (r_0/r) + k^2((z-z_0)(t-t_0) - (z-z_0)(t-t_0)r_0/r) \cos\phi - j/(kr) + jk(\cos\phi(z-z_0)(t-t_0)/r + r/2 - r_0 + r_0^2/(2r)) + jk^3(-\cos\phi(z-z_0)(t-t_0)r/2 + r_0 \cos\phi(z-z_0)(t-t_0) - r_0^2 \cos\phi(z-z_0)(t-t_0)/(2r))] \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分を得る。

【0071】また、近似ケース3に従う場合には、

$$Z_{11} = [j\omega\mu/(4\pi d_1 d_2)] \times \int \int [(z-z_0)(t-t_0)\cos\phi - (1/k^2)] \exp(-jkr)/r \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分に、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0) [1 - jk(r-r_0) - k^2(r-r_0)^2/2 + jk^3(r-r_0)^3/6]$$

を代入することで、

$$Z_{11} = [(\mu/\epsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [-1 + (r_0/r) + k^2(\cos\phi(z-z_0)(t-t_0) - r_0 \cos\phi(z-z_0)(t-t_0)/r + r^2/6 - r_0 r/2 + r_0^2/2 - r_0^3/(6r)) + k^4(\cos\phi(z-z_0)(t-t_0)r^2/6 - r_0 \cos\phi(z-z_0)(t-t_0)r/2 + (z-z_0)(t-t_0)\cos\phi r_0^2/2 - (z-z_0)(t-t_0)r_0^3 \cos\phi/(6r)) - j/(kr) + jk(\cos\phi(z-z_0)(t-t_0)/r + r/2 - r_0 + r_0^2/(2r)) + jk^3(-\cos\phi(z-z_0)(t-t_0)r/2 + r_0 \cos\phi(z-z_0)(t-t_0) - r_0^2 \cos\phi(z-z_0)(t-t_0)/(2r))] \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分を得る。

【0072】上述したように、図4に示す相互インピーダンス $Z_{11}$ は、近似ケース1に従う場合には、

$$Z_{11} = [(\mu/\epsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [-1 + (r_0/r) + k^2((z-z_0)(t-t_0) - (z-z_0)(t-t_0)r_0/r) \cos\phi - j/(kr) + jk \cos\phi(z-z_0)(t-t_0)/r] \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分となる。

【0073】これを整理すると、

$$Z_{11} = [(\mu/\epsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [-1 + (r_0/r) + k^2(zt - t_0 z - z_0 t + z_0 t_0 + (-zt + t_0 z + z_0 t - z_0 t_0)r_0/r) \cos\phi - j/(kr) + jk(zt - t_0 z - z_0 t + z_0 t_0) \cos\phi/r] \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分となる。

【0074】同様にして、図4に示す相互インピーダンス $Z_{00}$ は、

$$J_1 = (-z + z_1)/d_1, J_2 = (-t + t_1)/d_2$$

を、図9に図示する相互インピーダンス $Z_{1j}$ の一般式に代入することで、

$$Z_{00} = [j\omega\mu/(4\pi d_1 d_2)] \times \int \int [(z-z_1)(t-t_1)\cos\phi - (1/k^2)] \exp(-jkr)/r \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分を得る。

【0075】近似ケース1に従う場合には、これに、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0) [1 - jk(r-r_0)]$$

を代入することで、

$$10 \quad Z_{00} = [(\mu/\epsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [-1 + (r_0/r) + k^2((z-z_1)(t-t_1) - (z-z_1)(t-t_1)r_0/r) \cos\phi - j/(kr) + jk \cos\phi(z-z_1)(t-t_1)/r] \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分となる。

【0076】これを整理すると、

$$Z_{00} = [(\mu/\epsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [-1 + (r_0/r) + k^2(zt - t_1 z - z_1 t + z_1 t_1 + (-zt + t_1 z + z_1 t - z_1 t_1)r_0/r) \cos\phi - j/(kr) + jk(zt - t_1 z - z_1 t + z_1 t_1) \cos\phi/r] \cdot dzdt$$

20 但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分となる。

【0077】同様にして、図4に示す相互インピーダンス $Z_{01}$ は、

$$J_1 = (-z + z_1)/d_1, J_2 = (t - t_0)/d_2$$

を、図9に図示する相互インピーダンス $Z_{1j}$ の一般式に代入することで、

$$Z_{01} = [j\omega\mu/(4\pi d_1 d_2)] \times \int \int [-(z-z_1)(t-t_0)\cos\phi + 1/k^2] \exp(-jkr)/r \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分を得る。

30 【0078】近似ケース1に従う場合には、これに、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0) [1 - jk(r-r_0)]$$

を代入することで、

$$Z_{01} = [(\mu/\epsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [1 - (r_0/r) + k^2(-(z-z_1)(t-t_0) + (z-z_1)(t-t_0)r_0/r) \cos\phi + j/(kr) - jk \cos\phi(z-z_1)(t-t_0)/r] \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分となる。

【0079】これを整理すると、

$$40 \quad Z_{01} = [(\mu/\epsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [1 - (r_0/r) + k^2(-zt + t_0 z + z_1 t - z_1 t_0 + (zt - t_0 z - z_1 t + z_1 t_0)r_0/r) \cos\phi + j/(kr) + jk(-zt + t_0 z + z_1 t - z_1 t_0) \cos\phi/r] \cdot dzdt$$

但し、 $\int \int$ は $t_0$ から $t_1$ までと $z_0$ から $z_1$ までの積分となる。

【0080】同様にして、図4に示す相互インピーダンス $Z_{10}$ は、

$$J_1 = (z - z_0)/d_1, J_2 = (-t + t_1)/d_2$$

50 を、図9に図示する相互インピーダンス $Z_{1j}$ の一般式に代入することで、

17

$Z_{10} = [j\omega\mu/(4\pi d_1 d_2)] \times \int \int [-(z-z_0)(t-t_1)\cos\phi + 1/k^2] \exp(-jkr)/r \cdot dzdt$   
 但し、 $\int \int$  は  $t_0$  から  $t_1$  までと  $z_0$  から  $z_1$  までの積分を得る。

【0081】近似ケース1に従う場合には、これに、  
 $\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0)[1-jk(r-r_0)]$   
 を代入することで、  
 $Z_{10} = [(\mu/\varepsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [1 - (r_0/r) + k^2(-(z-z_0)(t-t_1) + (z-z_0)(t-t_1)r_0/r) \cos\phi + j/(kr) - jk \cos\phi (z-z_0)(t-t_1)/r] \cdot dzdt$   
 但し、 $\int \int$  は  $t_0$  から  $t_1$  までと  $z_0$  から  $z_1$  までの積分となる。

【0082】これを整理すると、  
 $Z_{10} = [(\mu/\varepsilon)^{1/2}/(4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [1 - (r_0/r) + k^2(-zt + t_1 z + z_0 t - z_0 t_1 + (zt - t_1 z - z_0 t + z_0 t_1)r_0/r) \cos\phi + j/(kr) + jk(-zt + t_1 z + z_0 t - z_0 t_1) \cos\phi/r] \cdot dzdt$   
 但し、 $\int \int$  は  $t_0$  から  $t_1$  までと  $z_0$  から  $z_1$  までの積分となる。

【0083】以上に説明したことから分かるように、図4に示すモノポール間の相互インピーダンス  $Z_{11}$ 、

$Z_{00}$ 、 $Z_{01}$ 、 $Z_{10}$  は、近似ケース1に従う場合には、

$$(1) \int \int 1/r \cdot dzdt$$

$$(2) \int \int (t_0 z/r + z_0 t/r) \cdot dzdt \quad *$$

$$r_{mn} = (z_m^2 + t_n^2 - 2z_m t_n \cos\phi + h^2)^{1/2}$$

$$a = [(1 + \cos\phi)/(1 - \cos\phi)]^{1/2}$$

$$u_{11} = r_{11} + z_1 - t_1 \cos\phi, \quad u_{10} = r_{10} + z_1 - t_0 \cos\phi$$

$$u_{01} = r_{01} + z_0 - t_1 \cos\phi, \quad u_{00} = r_{00} + z_0 - t_0 \cos\phi$$

$$v_{11} = r_{11} + t_1 - z_1 \cos\phi, \quad v_{10} = r_{10} + t_1 - z_0 \cos\phi$$

$$v_{01} = r_{01} + t_0 - z_1 \cos\phi, \quad v_{00} = r_{00} + t_0 - z_0 \cos\phi$$

$$q_1 = z_1^2 \sin^2\phi + h^2, \quad q_0 = z_0^2 \sin^2\phi + h^2$$

$$p_1 = t_1^2 \sin^2\phi + h^2, \quad p_0 = t_0^2 \sin^2\phi + h^2$$

ここで、 $z_1$ 、 $z_2$  はモノポールXの座標(図4)、 $t_1$ 、 $t_2$  はモノポールYの座標(図4)、 $\phi$  はモノポールXとモノポールYのなす角度(図8)、 $h$  はモノポールXとモノポールYとの間の距離(図8)であるから、全て既知である。また、 $r_{11}$ 、 $r_{01}$ 、 $r_{10}$ 、 $r_{00}$  は、モノポールXの端とモノポールYの端との間の距離を示しており、 $z_1$ 、 $z_2$ 、 $t_1$ 、 $t_2$  から算出できる。従って、ここで定義する値は、全て既知となる。

【0086】この定義を使うと、(1)式は、

$$\int \int 1/r \cdot dzdt = t_1 \ln u_{11} - t_1 \ln u_{01} - t_0 \ln u_{10} + t_0 \ln u_{00} + z_1 \ln v_{11} - z_1 \ln v_{10} - z_0 \ln v_{01} + z_0 \ln v_{00} - [(h/\sin\phi)] [\tan^{-1}(a/(r_{11}+t_1+z_1)) - \tan^{-1}(a/(r_{10}+t_0+z_1)) - \tan^{-1}(a/(r_{01}+t_1+z_0)) + \tan^{-1}(a/(r_{00}+t_0+z_1))] - 2a [\tan^{-1}(a/(r_{11}-t_1-z_1)) - \tan^{-1}(a/(r_{10}-t_0-z_1))] + 2a [\tan^{-1}(a/(r_{01}-t_1-z_0)) - \tan^{-1}(a/(r_{00}-t_0-z_0))]$$

但し、 $\sin\phi$  は絶対値

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0087】また、この定義を使うと、(2)式は、

$$\int \int (t_0 z/r + z_0 t/r) \cdot dzdt = [(t_0 + z_0 \cos\phi)/\sin^2\phi] [\int$$

18

\*但し、モノポールの組み合わせにより、 $t_0 \rightarrow t_1$ 、 $z_0$

$\rightarrow z_1$

$$(3) \int \int zt/r \cdot dzdt$$

$$(4) \int \int zt \cdot dzdt$$

$$(5) \int \int z \cdot dzdt$$

$$(6) \int \int t \cdot dzdt$$

$$(7) \int \int dzdt$$

を計算することで求まる。そして、近似ケース2や近似ケース3に従う場合には、これに加えて、

$$(8) \int \int r \cdot dzdt$$

$$(9) \int \int ztr \cdot dzdt$$

$$(10) \int \int (t_0 zr + z_0 zr) \cdot dzdt$$

但し、モノポールの組み合わせにより、 $t_0 \rightarrow t_1$ 、 $z_0$

$\rightarrow z_1$

を計算することで求まる。ここで、 $\int \int$  は  $t_0$  から  $t_1$  までと  $z_0$  から  $z_1$  までの積分である。

【0084】次に、これらが初等関数により計算できることについて説明する。ここで、(4)(5)(6)(7)式については自明であるので説明を省略する。先ず最初に、2つのモノポールが交差する場合( $\cos\phi \neq 1$ )について説明する。

【0085】次のような定義をする。

$$\int (z - t \cos\phi)/r \cdot dzdt + [(z_0 + t_0 \cos\phi)/\sin^2\phi] [\int \int (t - z \cos\phi)/r \cdot dzdt] = [(t_0 + z_0 \cos\phi)/\sin^2\phi] [\cos\phi z_1 (r_{11} - r_{10})/2 + \cos\phi z_0 (r_{00} - r_{01})/2 - t_1 (r_{11} - r_{01})/2 - t_0 (r_{00} - r_{10})/2 - (q_1 \ln(v_{11}/v_{10}))/2 + (q_0 \ln(v_{01}/v_{00}))/2] + [(t_0 + z_0 \cos\phi)/\sin^2\phi] [\cos\phi t_1 (r_{11} - r_{01})/2 + \cos\phi t_0 (r_{00} - r_{10})/2 - z_1 (r_{11} - r_{10})/2 - z_0 (r_{00} - r_{01})/2 - (p_1 \ln(u_{11}/u_{01}))/2 + (p_0 \ln(u_{10}/u_{00}))/2]$$

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

40 【0088】また、この定義を使うと、(3)式は、

$$\int \int zt/r \cdot dzdt = [\cos\phi/3] [t_1^3 \ln(u_{11}/u_{01}) + t_0^3 \ln(u_{00}/u_{10})] + [\cos\phi/3] [z_1^3 \ln(v_{11}/v_{10}) + z_0^3 \ln(v_{00}/v_{01})] + [2h^3 \cos\phi/(3 \sin^2\phi)] [\tan^{-1}(a/(r_{11}+t_1+z_1)) - \tan^{-1}(a/(r_{10}+t_0+z_1)) - \tan^{-1}(a/(r_{01}+t_1+z_0)) + \tan^{-1}(a/(r_{00}+t_0+z_1))] + [z_1^2 (r_{11} - r_{10})/3 + z_0^2 (r_{00} - r_{01})/3 + t_1^2 (r_{11} - r_{01})/3 + t_0^2 (r_{00} - r_{10})/3] + [h^2/(3 \sin^2\phi)] [r_{11} - r_{10} - r_{01} + r_{00}]$$

但し、 $\sin\phi$  は絶対値

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

50 【0089】また、この定義を使うと、(8)式は、

$$\int \int r \cdot dzdt = [-\cos \phi / 6] [z_1^2 (r_{11} - r_{10}) + z_0^2 (r_{00} - r_{01}) + t_1^2 (r_{11} - r_{01}) + t_0^2 (r_{00} - r_{10})] + [(z_1 t_1 r_{11} - z_1 t_0 r_{10} - z_0 t_1 r_{01} + z_0 t_0 r_{00}) / 3] - [2h^2 / (3 \sin \phi^*)] [\tan^{-1}(a / (r_{11} + t_1 + z_1)) - \tan^{-1}(a / (r_{10} + t_0 + z_1)) - \tan^{-1}(a / (r_{01} + t_1 + z_0)) + \tan^{-1}(a / (r_{00} + t_0 + z_0))] + [h^2 t_1 / 2 + t_1^3 \sin^2 \phi / 6] [\ln(u_{11} / u_{01})] + [h^2 t_0 / 2 + t_0^3 \sin^2 \phi / 6] [\ln(u_{00} / u_{10})] + [h^2 z_1 / 2 + z_1^3 \sin^2 \phi / 6] [\ln(v_{11} / v_{10})] + [h^2 z_0 / 2 + z_0^3 \sin^2 \phi / 6] [\ln(v_{00} / v_{01})]$$

但し、 $\sin \phi^*$  は絶対値

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0090】また、この定義に使うと、(9) 式は、

$$\int \int ztr \cdot dzdr = [t_1^5 \sin^2 \phi \cos \phi / 10 + h^2 t_1^3 \cos \phi / 6] [\ln(u_{11} / u_{01})] + [t_0^5 \sin^2 \phi \cos \phi / 10 + h^2 t_0^3 \cos \phi / 6] [\ln(u_{00} / u_{10})] + [z_1^5 \sin^2 \phi \cos \phi / 10 + h^2 z_1^3 \cos \phi / 6] [\ln(v_{11} / v_{10})] + [z_0^5 \sin^2 \phi \cos \phi / 10 + h^2 z_0^3 \cos \phi / 6] [\ln(v_{00} / v_{01})] + [1/15 - \cos^2 \phi / 10] [(t_1^4 + z_1^4) r_{11} - (t_0^4 + z_1^4) r_{10} - (t_1^4 + z_0^4) r_{01} + (t_0^4 + z_0^4) r_{00}] - [\cos \phi / 30] [(z_1 t_1^3 + z_1^3 t_1) r_{11} - (z_1 t_0^3 + z_1^3 t_0) r_{10} + (z_0 t_1^3 + z_0^3 t_1) r_{01} - (z_0 t_0^3 + z_0^3 t_0) r_{00}] + [2/15] [z_1^2 t_1^2 r_{11} - z_1^2 t_0^2 r_{10} - z_0^2 t_1^2 r_{01} + z_0^2 t_0^2 r_{00}] + [2h^2 / 15] [(t_1^2 + z_1^2) r_{11} - (t_0^2 + z_1^2) r_{10} - (t_1^2 + z_0^2) r_{01} + (t_0^2 + z_0^2) r_{00}] + [h^4 / (15 \sin^2 \phi)] [r_{11} - r_{10} - r_{01} + r_{00}] + [2 \cos \phi h^5 / (15 \sin \phi^*)] [\tan^{-1}(a / (r_{11} + t_1 + z_1)) - \tan^{-1}(a / (r_{10} + t_0 + z_1)) - \tan^{-1}(a / (r_{01} + t_1 + z_0)) + \tan^{-1}(a / (r_{00} + t_0 + z_0))]$$

但し、 $\sin \phi^*$  は絶対値

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0091】また、この定義に使うと、(10) 式は、

$$\int \int (t_0 z r + z_0 t r) \cdot dzdr = [(t_0 + z_0 \cos \phi) / (3 \sin^2 \phi)] \times [(1/4) r_{11}^3 (t_1 - z_1 \cos \phi) + (3q_1/8) r_{11} (t_1 - z_1 \cos \phi) + (3q_1^2/8) \ln v_{11} - (1/4) r_{10}^3 (t_0 - z_1 \cos \phi) - (3q_1/8) r_{10} (t_0 - z_1 \cos \phi) - (3q_1^2/8) \ln v_{10} - (1/4) r_{01}^3 (t_1 - z_0 \cos \phi) - (3q_1/8) r_{01} (t_1 - z_0 \cos \phi) - (3q_1^2/8) \ln v_{01} + (1/4) r_{00}^3 (t_0 - z_0 \cos \phi) + (3q_1/8) r_{00} (t_0 - z_0 \cos \phi) + (3q_1^2/8) \ln v_{00}] + [(z_0 + t_0 \cos \phi) / (3 \sin^2 \phi)] \times [(1/4) r_{11}^3 (z_1 - t_1 \cos \phi) + (3p_1/8) r_{11} (z_1 - t_1 \cos \phi) + (3p_1^2/8) \ln u_{11} - (1/4) r_{01}^3 (z_0 - t_1 \cos \phi) - (3p_1/8) r_{01} (z_0 - t_1 \cos \phi) - (3p_1^2/8) \ln u_{01} - (1/4) r_{10}^3 (z_1 - t_0 \cos \phi) - (3p_1/8) r_{10} (z_1 - t_0 \cos \phi) - (3p_1^2/8) \ln u_{10} + (1/4) r_{00}^3 (z_0 - t_0 \cos \phi) + (3p_1/8) r_{00} (z_0 - t_0 \cos \phi) + (3p_1^2/8) \ln u_{00}]$$

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0092】このようにして、2つのモノポールが交差する場合 ( $\cos \phi \neq 1$ ) には、図4に示すモノポール間の相互インピーダンス  $Z_{11}$ ,  $Z_{00}$ ,  $Z_{01}$ ,  $Z_{10}$  は、初等関数により計算できることになる。

【0093】次に、2つのモノポールが平行な場合 ( $\cos \phi = 1$ ) について説明する。ここで、「 $\cos \phi = 1$ 」であることから、「 $r = ((z - t)^2 + h^2)$ 」が成立する。

【0094】次のような定義をする。上述したように、ここで定義する値は、全て既知となる。

$$u_{11} = r_{11} + z_1 - t_1, \quad u_{10} = r_{10} + z_1 - t_0$$

$$u_{01} = r_{01} + z_0 - t_1, \quad u_{00} = r_{00} + z_0 - t_0$$

$$v_{11} = r_{11} + t_1 - z_1, \quad v_{10} = r_{10} + t_0 - z_1$$

$$v_{01} = r_{01} + t_1 - z_0, \quad v_{00} = r_{00} + t_0 - z_0$$

この定義を使うと、(1) 式は、

$$\int \int 1/r \cdot dzdt = t_1 \ln(u_{11}/u_{01}) + t_0 \ln(u_{00}/u_{10}) + z_1 \ln(u_{11}/u_{10}) + z_0 \ln(u_{00}/u_{01}) + r_{11} - r_{10} - r_{01} + r_{00}$$

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0095】また、この定義を使うと、(2) 式を構成

10 する「 $\int \int t/r \cdot dzdt$ 」は、

$$\int \int t/r \cdot dzdt = (t_1^2/2) \ln(u_{11}/u_{01}) + (t_0^2/2) \ln(u_{00}/u_{10}) + (z_1^2/2 - h^2/4) \ln(v_{11}/v_{10}) + (z_0^2/2 - h^2/4) \ln(v_{00}/v_{01}) + (3z_1/4) (r_{11} - r_{10}) + (3z_0/4) (r_{00} - r_{01}) + (t_1/4) (r_{11} - r_{01}) + (t_0/4) (r_{00} - r_{10})$$

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0096】また、この定義を使うと、(2) 式を構成

20 する「 $\int \int z/r \cdot dzdt$ 」は、

$$\int \int z/r \cdot dzdt = (z_1^2/2) \ln(v_{11}/v_{10}) + (z_0^2/2) \ln(v_{00}/v_{01}) + (t_1^2/2 - h^2/4) \ln(u_{11}/u_{01}) + (t_0^2/2 - h^2/4) \ln(u_{00}/u_{10}) + (z_1/4) (r_{11} - r_{10}) + (z_0/4) (r_{00} - r_{01}) + (3t_1/4) (r_{11} - r_{01}) + (3t_0/4) (r_{00} - r_{10})$$

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0097】また、この定義を使うと、(3) 式は、

$$\int \int zt/r \cdot dzdt = (z_1^3/3) \ln(v_{11}/v_{10}) + (z_0^3/3) \ln(v_{00}/v_{01}) + (t_1^3/3) \ln(u_{11}/u_{01}) + (t_0^3/3) \ln(u_{00}/u_{10}) + r_{11} ((4t_1^2/9) + (4z_1^2/9) + (z_1 t_1/9) + (h^2/9)) - r_{10} ((4t_0^2/9) + (4z_1^2/9) + (z_1 t_0/9) + (h^2/9)) - r_{01} ((4t_1^2/9) + (4z_0^2/9) + (z_0 t_1/9) + (h^2/9)) + r_{00} ((4t_0^2/9) + (4z_0^2/9) + (z_0 t_0/9) + (h^2/9))$$

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

30 また、この定義を使うと、(8) 式は、

$$\int \int r \cdot dzdt = (h^2 t_1/2) \ln(u_{11}/u_{01}) + (h^2 t_0/2) \ln(u_{00}/u_{10}) + (h^2 z_1/2) \ln(v_{11}/v_{10}) + (h^2 z_0/2) \ln(v_{00}/v_{01}) - (1/6) [z_1^2 (r_{11} - r_{10}) + z_0^2 (r_{00} - r_{01}) + t_1^2 (r_{11} - r_{01}) + t_0^2 (r_{00} - r_{10})] + (1/3) (r_{11} z_1 t_1 - r_{10} z_1 t_0 - r_{01} z_0 t_1 + r_{00} z_0 t_0) + (h^2/3) (r_{11} - r_{10} - r_{01} + r_{00})$$

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0098】また、この定義に使うと、(9) 式は、

$$\int \int ztr \cdot dzdr = (-1/30) [z_1^4 (r_{11} - r_{10}) + z_0^4 (r_{00} - r_{01}) + t_1^4 (r_{11} - r_{01}) + t_0^4 (r_{00} - r_{10})] - (1/30) [z_1 t_1 (z_1^2 + t_1^2) r_{11} - z_1 t_0 (z_1^2 + t_0^2) r_{10} - z_0 t_1 (z_0^2 + t_1^2) r_{01} + z_0 t_0 (z_0^2 + t_0^2) r_{00}] + (2/15) [z_1^2 t_1^2 r_{11} - z_1^2 t_0^2 r_{10} - z_0^2 t_1^2 r_{01} + z_0^2 t_0^2 r_{00}] + (h^2/45) [z_1 t_1 r_{11} - z_1 t_0 r_{10} - z_0 t_1 r_{01} + z_0 t_0 r_{00}] + (7h^2/45) [z_1^2 (r_{11} - r_{10}) + z_0^2 (r_{00} - r_{01}) + t_1^2 (r_{11} - r_{01}) + t_0^2 (r_{00} - r_{10})] + (h^2/45) [r_{11} - r_{10} - r_{01} + r_{00}] + (h^2 z_1^3/6) \ln(v_{11}/v_{10}) + (h^2 z_0^3/6) \ln(v_{00}/v_{01}) + (h^2 t_1^3/6) \ln(u_{11}/u_{01}) + (h^2 t_0^3/6) \ln(u_{00}/u_{10})$$

と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0099】また、この定義に使うと、(10) 式を構成

50 する「 $\int \int tr \cdot dzdr$ 」は、

$$\int \int tr \cdot dzdr = (h^2 z_1^2/4) \ln(v_{11}/v_{10}) + (h^2 z_0^2/4) \ln(v_{00}/v_{01})$$

$v_{10}) + (h^2 t_1^2 / 4) \ln(u_{11} / u_{01}) + (h^2 t_0^2 / 4) \ln(u_{00} / u_{10}) - (h^4 / 16) \ln(v_{00} v_{11} / (v_{01} v_{10})) - (1/24) [z_1^3 (r_{11} - r_{10}) + z_0^3 (r_{00} - r_{01})] - (1/8) [t_1^3 (r_{11} - r_{01}) + t_0^3 (r_{00} - r_{10})] - (1/24) [z_1^2 t_1 r_{11} - z_1^2 t_0 r_{10} - z_0^2 t_1 r_{01} + z_0^2 t_0 r_{00}] + (5/24) [z_1 t_1^2 r_{11} - z_1 t_0^2 r_{10} - z_0 t_1^2 r_{01} + z_0 t_0^2 r_{00}] + (13/48) h^2 [z_1 (r_{11} - r_{10}) + z_0 (r_{00} - r_{01})] + (1/16) h^2 [t_1 (r_{11} - r_{01}) + t_0 (r_{00} - r_{10})]$ と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0100】また、この定義に使うと、(10)式を構成する「 $\int \int z r \cdot dz dr$ 」は、

$\int \int z r \cdot dz dr = (h^2 z_1^2 / 4) \ln(v_{11} / v_{10}) + (h^2 z_0^2 / 4) \ln(v_{00} / v_{01}) + (h^2 t_1^2 / 4) \ln(u_{11} / u_{01}) + (h^2 t_0^2 / 4) \ln(u_{00} / u_{10}) + (h^4 / 16) \ln(v_{11} v_{00} / (v_{01} v_{10})) - (1/24) [t_1^3 (r_{11} - r_{01}) + t_0^3 (r_{00} - r_{10})] - (1/8) [z_1^3 (r_{11} - r_{10}) + z_0^3 (r_{00} - r_{01})] - (1/24) [z_1 t_1^2 r_{11} - z_1 t_0^2 r_{10} - z_0 t_1^2 r_{01} + z_0 t_0^2 r_{00}] + (5/24) [z_1^2 t_1 r_{11} - z_1^2 t_0 r_{10} - z_0^2 t_1 r_{01} + z_0^2 t_0 r_{00}] + (13/48) h^2 [t_1 (r_{11} - r_{01}) + t_0 (r_{00} - r_{10})] + (1/16) h^2 [z_1 (r_{11} - r_{10}) + z_0 (r_{00} - r_{01})]$ と表される。すなわち、解析的に求めることができる。

【0101】このようにして、2つのモノポールが平行な場合 ( $\cos \phi = 1$ ) にも、図4に示すモノポール間の相互インピーダンス  $Z_{11}$ ,  $Z_{00}$ ,  $Z_{01}$ ,  $Z_{10}$  は、初等関数により計算できることになる。

【0102】以上に説明したことを要約すると、次のようになる。すなわち、図2に図示する相互インピーダンス算出ルーチン211は、モノポールに三角形関数の電流が流れることを想定するとともに、モノポール間の相互インピーダンスの算出式の中に含まれる  $\exp(-jkr)$  を、 $\exp(-jkr_0)$  と、 $\exp[-jkr(r-r_0)]$  のテイラー展開式との乗算式で近似しつつ、モノポール間の相互インピーダンスを算出する。

【0103】このとき導出されるモノポール間の相互インピーダンスは、例えば、 $\exp(-jkr)$  を、 $\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0) [1 - jk(r-r_0) - k^2(r-r_0)^2/2 + jk^3(r-r_0)^3/6]$

で近似 (近似ケース3) する場合には、

$Z_{11} = [(\mu / \varepsilon)^{1/2} / (4\pi d_1 d_2)] \exp(-jkr_0) \times \int \int [-1 + (r_0/r) + k^2(\cos \phi (z-z_0)(t-t_0) - r_0 \cos \phi (z-z_0)(t-t_0)/r + r^2/6 - r_0 r/2 + r_0^2/2 - r_0^3/(6r)) + k^4(\cos \phi (z-z_0)(t-t_0)r^2/6 - r_0 \cos \phi (z-z_0)(t-t_0)r/2 + (z-z_0)(t-t_0)\cos \phi r_0^2/2 - (z-z_0)(t-t_0)r_0^3 \cos \phi / (6r)) - j/(kr) + jk(\cos \phi (z-z_0)(t-t_0)/r + r/2 - r_0 + r_0^2/(2r)) + jk^3(-\cos \phi (z-z_0)(t-t_0)r/2 + r_0 \cos \phi (z-z_0)(t-t_0) - r_0^2 \cos \phi (z-z_0)(t-t_0)/(2r))] \cdot dz dt$

という関数となる。

【0104】この関数の関数値は、初等関数により解析的に求められることになる。これから、相互インピーダンス算出ルーチン211は、従来技術と異なつて、解析的手法によりモノポール間の相互インピーダンスを算出できるようになる。なお、この初等関数は、当然のことながら数値的手法により求めることも可能である。

【0105】更に説明するならば、このモノポール間の

相互インピーダンスは、

$Z = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_2 k^2 + a_4 k^4 + \dots) + j(a_{-1}/k + a_1 k + a_3 k^3 + \dots)]$

というように、波数  $k$  の巾乗で展開される関数形状を有している。従つて、この式に、虚数部を持つ  $k$  を代入することで、損失のある空間でのモノポール間の相互インピーダンスを算出することが可能になる。

【0106】次に、図5ないし図7に示す相互インピーダンス算出ルーチン211の実行する処理フローの一実施例に従つて、本発明について詳細に説明する。先ず最初に、図5の処理フローについて説明する。

【0107】相互インピーダンス算出ルーチン211は、図3の処理フローで説明したように、解析対象となる電子機器がメッシュ化された後、シミュレーション対象となる周波数を指定して、そのメッシュ化された要素間の相互インピーダンスを算出すべく起動されることになる。

【0108】このようにして起動されると、相互インピーダンス算出ルーチン211は、メッシュ化された要素を順番に選択し、図5の処理フローに従つて、その選択した2つの要素間の相互インピーダンスを算出 (ワイヤ間の相互インピーダンスについては、モノポール間相互インピーダンスそのものを算出することで算出し、サーフェスパッチ間の相互インピーダンスについては、モノポール間相互インピーダンスを2重積分することで算出する) する処理に入る。

【0109】ここで、この図5の処理フローでは、相互インピーダンス算出ルーチン211は、例えば近似ケース3で近似することを前提として、2つのモノポールが平行のとき ( $\cos \phi = 1$ ) にモノポール間相互インピーダンスの算出処理に用いる算出プログラム300と、2つのモノポールが直交するとき ( $\cos \phi = 0$ ) にモノポール間相互インピーダンスの算出処理に用いる算出プログラム301と、2つのモノポールが非平行かつ非直交するとき ( $\cos \phi \neq 1, 0$ ) にモノポール間相互インピーダンスの算出処理に用いる算出プログラム302とを別々に用意する構成を採っている。

【0110】この算出プログラム300は、上述したモノポール間相互インピーダンスの算出処理手順において、「 $\cos \phi = 1$ 」を前提とすることで作成されるプログラムであり、「 $\cos \phi \neq 1, 0$ 」を前提とすることで作成される算出プログラム302よりも大幅に少ないプログラムステップで構成されている。また、算出プログラム301は、上述したモノポール間相互インピーダンスの算出処理手順において、「 $\cos \phi = 0$ 」を前提とすることで作成されるプログラムであり、「 $\cos \phi \neq 1, 0$ 」を前提とすることで作成される算出プログラム302よりも大幅に少ないプログラムステップで構成されている。

【0111】相互インピーダンス算出ルーチン211

は、相互インピーダンスの算出対象となるメッシュ化された2つの要素を選択すると、図5の処理フローに示すように、先ず最初に、ステップ1で、その選択した2つの要素の指すモノポールのなす角度 $\phi$ が平行であるのか否かを判断して、平行であることを判断するとき、すなわち、2つのモノポールのなす角度 $\phi$ が0度であることを判断するときには、ステップ2に進んで、2つのモノポールが平行のとき( $\cos \phi = 1$ )に用いる算出プログラム300を呼び出す。

【0112】一方、ステップ1で、選択した2つの要素の指すモノポールのなす角度 $\phi$ が平行でないことを判断するときには、ステップ3に進んで、その選択した2つの要素の指すモノポールのなす角度 $\phi$ が直交するのか否かを判断して、直交することを判断するとき、すなわち、2つのモノポールのなす角度 $\phi$ が90度であることを判断するときには、ステップ4に進んで、2つのモノポールが直交するとき( $\cos \phi = 1$ )に用いる算出プログラム300を呼び出す。

【0113】一方、ステップ3で、選択した2つの要素の指すモノポールのなす角度 $\phi$ が直交しないことを判断するとき、すなわち、その選択した2つの要素の指すモノポールのなす角度 $\phi$ が非平行かつ非直交することを判断するときには、ステップ5に進んで、2つのモノポールが非平行かつ非直交するとき( $\cos \phi \neq 1, 0$ )に用いる算出プログラム302を呼び出す。

【0114】ステップ2/ステップ4/ステップ5で、モノポール間相互インピーダンスの算出処理に用いる算出プログラム300、301、302を呼び出すと、ステップ6に進んで、その呼び出した算出プログラム300、301、302を使って、モノポール間の相互インピーダンスを算出する。

【0115】このモノポール間相互インピーダンスの算出処理は、上述したように、初等関数により解析的に求められることになるので、従来技術に比べて極めて高速に求めることができるようになる。

【0116】モノポール間相互インピーダンスを算出すると、続いて、ステップ7で、選択した2つの要素がサーフェISPATCHであるのか否かを判断して、サーフェISPATCHであることを判断するときには、ステップ8に進んで、算出したモノポール間相互インピーダンスを2重積分することで、選択した2つの要素間の相互インピーダンスを求めて処理を終了する。

【0117】一方、ステップ7で、選択した2つの要素がサーフェISPATCHでないことを判断するとき、すなわち、選択した2つの要素がワイヤであることを判断するときには、ステップ8の処理を省略して、ステップ6で算出したモノポール間相互インピーダンスをそのまま使うことで、選択した2つの要素間の相互インピーダンスを求めて処理を終了する。

【0118】なお、ワイヤとサーフェISPATCHとの間

の相互インピーダンスは、ワイヤを広がりを持たないサーフェISPATCHと見なして2重積分することで求まることになる。

【0119】このようにして、相互インピーダンス算出ルーチン211は、初等関数を使ってモノポール間相互インピーダンスを求めることで、メッシュ化された要素間の相互インピーダンスを高速に求めるのである。

【0120】更に、この図5の処理フローに従う場合には、2つのモノポールが平行のとき( $\cos \phi = 1$ )に用いる算出プログラム300と、2つのモノポールが直交するとき( $\cos \phi = 0$ )に用いる算出プログラム301と、2つのモノポールが非平行かつ非直交するとき( $\cos \phi \neq 1, 0$ )に用いる算出プログラム302とを別々に用意する構成を採って、メッシュ化された2つの要素が平行のときには算出プログラム300を使い、直交するときには算出プログラム301を使い、非平行かつ非直交するときには算出プログラム302を使って相互インピーダンスを求める構成を採るので、一層の高速算出処理を実現できるようになる。

【0121】次に、図6の処理フローについて説明する。ここで、この図6の処理フローでは、相互インピーダンス算出ルーチン211は、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0)[1-jk(r-r_0)]$$

と近似する近似ケース1に従ってモノポール間相互インピーダンスの算出処理を実行する算出プログラム400と、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0)[1-jk(r-r_0)-k^2(r-r_0)^2/2]$$

と近似する近似ケース2に従ってモノポール間相互インピーダンスの算出処理を実行する算出プログラム401と、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jkr_0)[1-jk(r-r_0)-k^2(r-r_0)^2/2+jk^3(r-r_0)^3/6]$$

と近似する近似ケース3に従ってモノポール間相互インピーダンスの算出処理を実行する算出プログラム402とを別々に用意する構成を採っている。

【0122】この近似式から分かるように、算出プログラム400は、算出プログラム401、402よりも大幅に少ないプログラムステップで構成されている。また、算出プログラム401は、算出プログラム402よりも大幅に少ないプログラムステップで構成されている。ここで、図5の処理フローで説明したように、算出プログラム400、401、402のそれぞれは、更に、2つのモノポールが平行のときに用いる算出プログラムと、2つのモノポールが直交するときに用いる算出プログラムと、2つのモノポールが非平行かつ非直交するときに用いる算出プログラムとで構成されていることが好ましい。

【0123】相互インピーダンス算出ルーチン211は、図6の処理フローに従う場合には、相互インピーダンスの算出対象となるメッシュ化された2つの要素を選

択すると、先ず最初に、ステップ1で、その選択した2つの要素の指すモノポール長の指定される周波数の指す波長( $\lambda$ )に比べて短いのか否かを判断して、 $0.1\lambda$ 以下の長さを持つ短いモノポールであることを判断するときには、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jk r_0) [1 - jk(r - r_0)]$$

という粗い近似でも十分な精度を実現できる近似ケース1用の算出プログラム400を呼び出す。

【0124】一方、ステップ1で、選択した2つの要素の指すモノポール長の指定される周波数の指す波長に比べて短くないことを判断するときには、ステップ3に進んで、その選択した2つの要素の指すモノポールの長さが指定される周波数の指す波長( $\lambda$ )に比べて中位の長さを持つのか否かを判断して、 $0.1\lambda$ 程度の長さを持つ中位の長さのモノポールであることを判断するときには、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jk r_0) [1 - jk(r - r_0) - k^2(r - r_0)^2/2]$$

という中程度の近似レベルを持つ近似ケース2用の算出プログラム401を呼び出す。

【0125】一方、ステップ3で、選択した2つの要素の指すモノポール長の指定される周波数の指す波長に比べて中位の長さでないことを判断するときには、ステップ4に進んで、

$$\exp(-jkr) \approx \exp(-jk r_0) [1 - jk(r - r_0) - k^2(r - r_0)^2/2 + jk^3(r - r_0)^3/6]$$

という高精度の近似レベルを持つ近似ケース3用の算出プログラム401を呼び出す。

【0126】ステップ2/ステップ4/ステップ5で、モノポール間相互インピーダンスの算出処理に用いる算出プログラム400、401、402を呼び出すと、ステップ6に進んで、その呼び出した算出プログラム400、401、402を使って、モノポール間の相互インピーダンスを算出する。

【0127】このモノポール間相互インピーダンスの算出処理は、上述したように、初等関数により解析的に求められることになるので、従来技術に比べて極めて高速に求めることができるようになる。

【0128】モノポール間相互インピーダンスを算出すると、続いて、ステップ7で、選択した2つの要素がサーフェスパッチであるのか否かを判断して、サーフェスパッチであることを判断するときには、ステップ8に進んで、算出したモノポール間相互インピーダンスを2重積分することで、選択した2つの要素間の相互インピーダンスを求めて処理を終了する。

【0129】一方、ステップ7で、選択した2つの要素がサーフェスパッチでないことを判断するとき、すなわち、選択した2つの要素がワイヤであることを判断するときには、ステップ8の処理を省略して、ステップ6で算出したモノポール間相互インピーダンスをそのまま使うことで、選択した2つの要素間の相互インピーダン

スを求めて処理を終了する。

【0130】このようにして、相互インピーダンス算出ルーチン211は、初等関数を使ってモノポール間相互インピーダンスを求めることで、メッシュ化された要素間の相互インピーダンスを高速に求めるのである。

【0131】更に、この図6の処理フローに従う場合には、モノポールの長さが短いときに用いる近似ケース1用の算出プログラム400と、モノポールの長さが中位のときに用いる近似ケース2用の算出プログラム401と、モノポールの長さが長いときに用いる近似ケース3用の算出プログラム402とを別々に用意する構成を採って、メッシュ化された要素の長さが指定される周波数の指す波長に比べて短いときには算出プログラム400を使い、中位のときには算出プログラム401を使い、長いときには算出プログラム402を使って相互インピーダンスを求める構成を採るので、一層の高速算出処理を実現できるようになる。

【0132】次に、図7の処理フローについて説明する。相互インピーダンス算出ルーチン211は、この処理フローに従う場合には、1番目の周波数が指定されると、図7(a)の処理フローに示すように、先ず最初に、ステップ1で、相互インピーダンスの算出対象となるメッシュ化された2つの要素を選択して、上述した算出プログラム300、301、302や算出プログラム400、401、402を使って、この選択した2つの要素の指すモノポール間の相互インピーダンスを算出する。

【0133】このとき算出されるモノポール間相互インピーダンスは、上述したように、

$$Z = e^{-jk r_0} [(a_0 + a_2 k^2 + a_4 k^4 + \dots) + j(a_{-1}/k + a_1 k + a_3 k^3 + \dots)]$$

という波数 $k$ の巾乗で展開される関数形状を有している。

【0134】続いて、ステップ2で、算出したモノポール間相互インピーダンスに従って、この波数 $k$ の巾乗で表される関数の係数値 $a_i$ を抽出し、選択した要素がサーフェスパッチであるときには、この係数値 $a_i$ を2重積分する。そして、選択した要素がワイヤであるときには、この抽出した係数値 $a_i$ を係数ファイル500に格納し、選択した要素がサーフェスパッチであるときには、この係数値 $a_i$ の2重積分値を係数ファイル500に格納する。

【0135】このようにして、係数ファイル500には、メッシュ化された2つの要素に対応付けられる係数値 $a_i$ あるいはその2重積分値が格納されることになる。一方、相互インピーダンス算出ルーチン211は、2番目以降の周波数が指定されると、図7(b)の処理フローに示すように、先ず最初に、ステップ1で、相互インピーダンスの算出対象となるメッシュ化された2つの要素を選択して、係数ファイル500から、その2つ



の要素に対応付けられる係数値  $a_i$  (あるいはその2重積分値) を読み出す。

【0136】続いて、ステップ2で、その読み出した係数値  $a_i$  (あるいはその2重積分値) と、指定される周波数の指す波数 ( $k$ ) とを、

$$Z = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_2 k^2 + a_4 k^4 + \dots) + j(a_{-1}/k + a_1 k + a_3 k^3 + \dots)]$$

に代入することで、2番目以降の周波数での選択したメッシュ化された2つの要素間の相互インピーダンスを算出する。

【0137】このようにして、相互インピーダンス算出ルーチン211は、図7の処理フローに従う場合には、1番目の周波数が指定されると、その周波数でのメッシュ化された要素間の相互インピーダンスを算出することで、ワイヤ間については、

$$Z = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_2 k^2 + a_4 k^4 + \dots) + j(a_{-1}/k + a_1 k + a_3 k^3 + \dots)]$$

の係数値  $a_i$  を求め、サーフェスパッチ間については、

$$Z = e^{-jkr_0} [( \int \int a_0 dvde + k^2 \int \int a_2 dvde + k^4 \int \int a_4 dvde + \dots ) + j( (1/k) \int \int a_{-1} dvde + k \int \int a_1 dvde + k^3 \int \int a_3 dvde + \dots )]$$

というように係数値  $a_i$  の2重積分値を求めて、2番目以降の周波数については、この近似式に、周波数の指す波数 ( $k$ ) を代入することで要素間の相互インピーダンスを算出するのである。

【0138】この算出処理に従って、相互インピーダンス算出ルーチン211は、メッシュ化された要素間の相互インピーダンスを一層高速に求められようになる。この相互インピーダンスの算出手法は、波数 ( $k$ ) が変化しても、係数値  $a_i$  やその2重積分値が変化しないときに有効となる。この条件は、モノポールの高さが周波数の指す波長に比べて短いときに成立する。

【0139】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のシミュレーション装置によれば、電子機器を要素に分割し、周波

数が与えられるときに、要素間の相互インピーダンスを算出して、それらと要素の持つ波源とからモーメント法に従って各要素に流れる電流をシミュレーションする構成を採るときにあつて、要素間の相互インピーダンスを初等関数により高速に算出できるようになることから、各要素に流れる電流を高速にシミュレーションできるようになる。

【0140】しかも、要素間の相互インピーダンスの対称性とリアクションマッチングとを保持しつつ、要素間の相互インピーダンスを算出する構成を採ることから、従来技術の持つ特徴を保持しつつ、各要素に流れる電流を高速にシミュレーションできるようになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の原理構成図である。

【図2】本発明の一実施例である。

【図3】電磁界強度算出プログラムの実行する処理フローである。

【図4】相互インピーダンスの説明図である。

【図5】相互インピーダンス算出ルーチンの実行する処理フローである。

【図6】相互インピーダンス算出ルーチンの実行する処理フローである。

【図7】相互インピーダンス算出ルーチンの実行する処理フローである。

【図8】相互インピーダンスの導出説明図である。

【図9】相互インピーダンスの説明図である。

【図10】相互インピーダンスの導出説明図である。

【符号の説明】

- 1 シミュレーション装置
- 10 入力手段
- 11 分割手段
- 12 管理手段
- 13 算出手段
- 14 記憶手段
- 15 シミュレーション手段

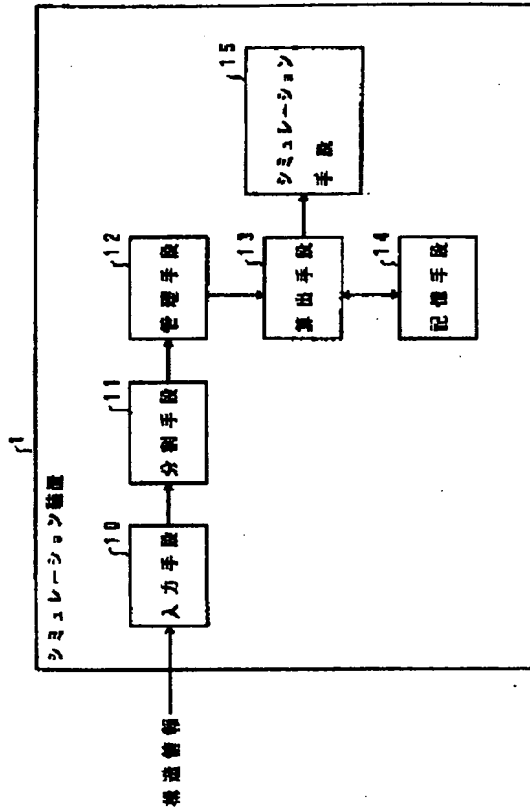
【図9】

相互インピーダンスの説明図

$$Z = j\omega \int \left[ \frac{\mu}{4\pi} J_1 J_2 \cos\phi \frac{e^{-jkr}}{r} + \frac{1}{4\pi\epsilon} \rho_1 \rho_2 \frac{e^{-jkr}}{r} \right] ds$$

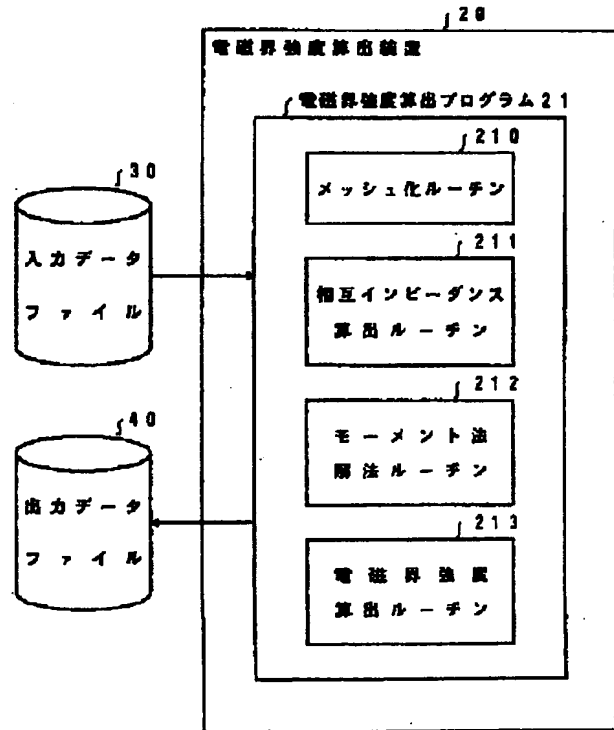
【図1】

本発明の処理構成図



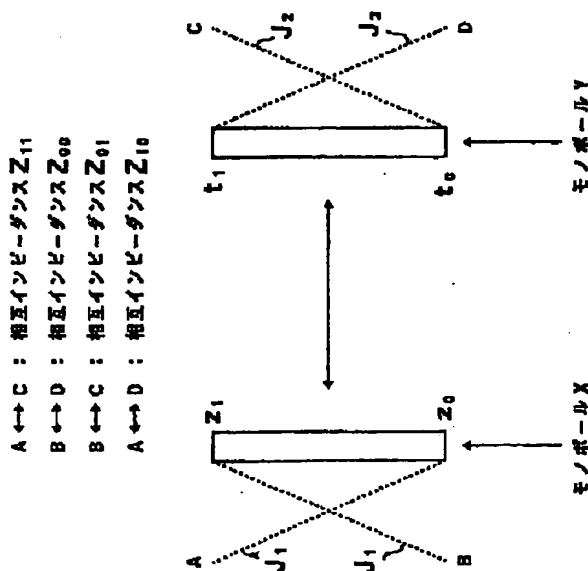
【図2】

本発明の一実施例



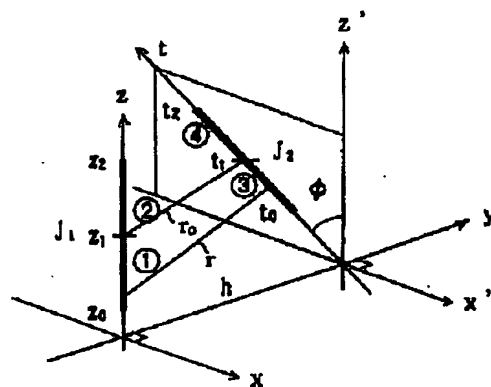
【図4】

相互インピーダンスの説明図



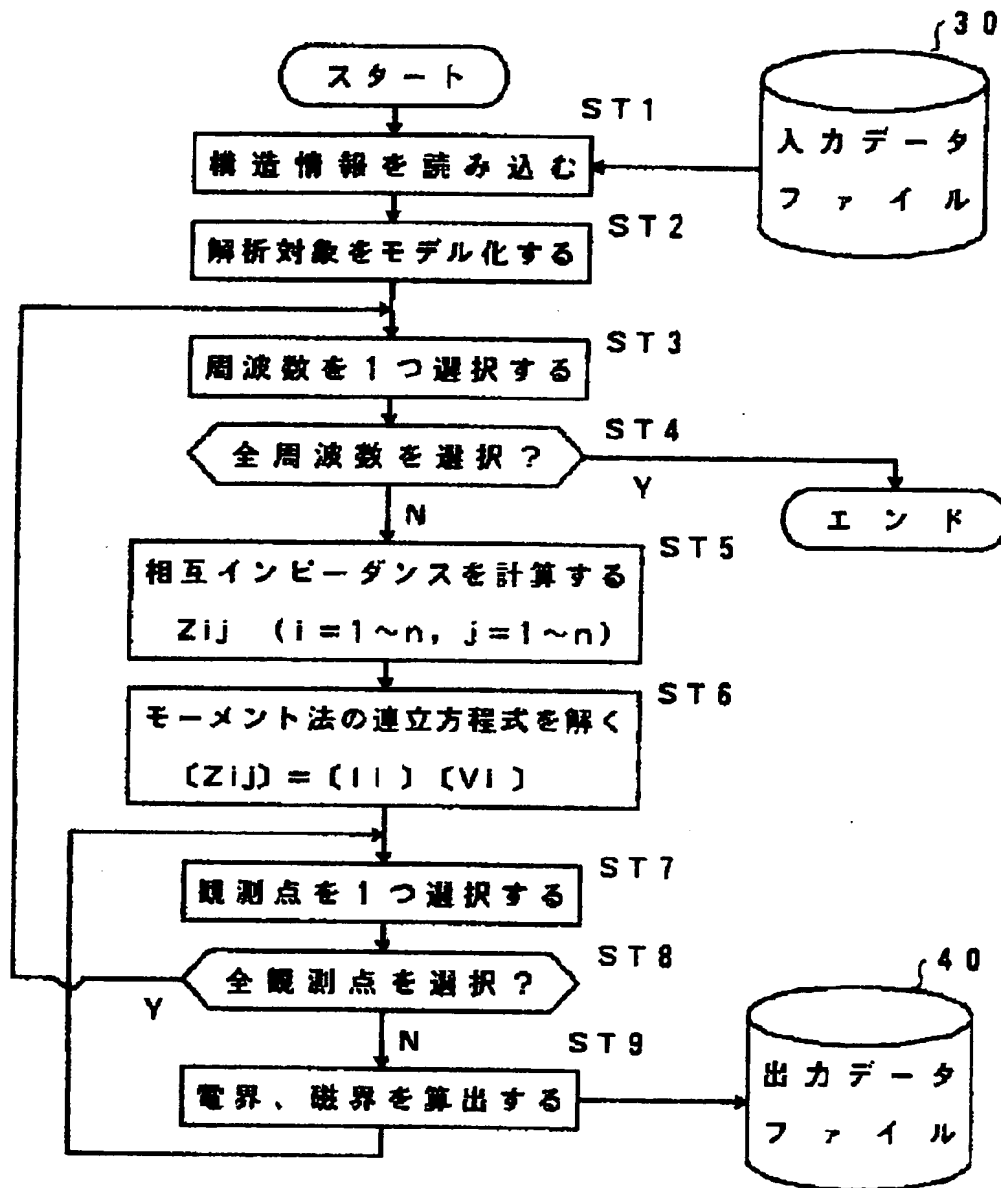
【図8】

相互インピーダンスの導出説明図



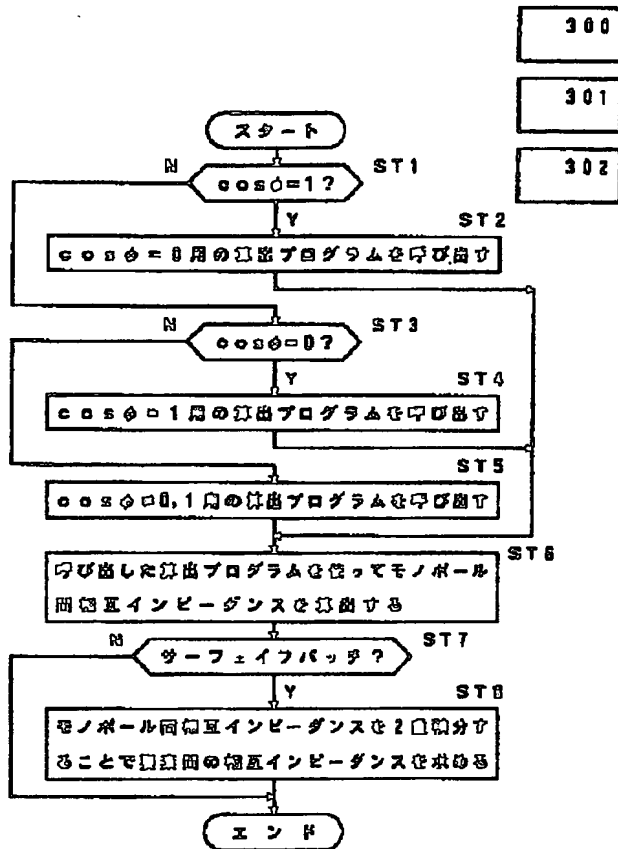
【図3】

## 電磁界強度算出プログラムの実行する処理フロー



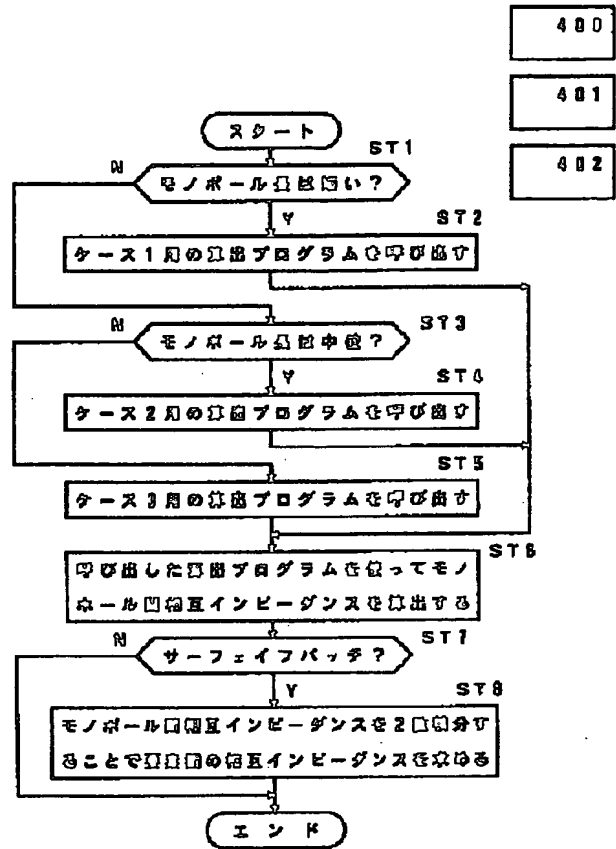
【図5】

相互インピーダンス算出ルーチンの実行する処理フロー



【図6】

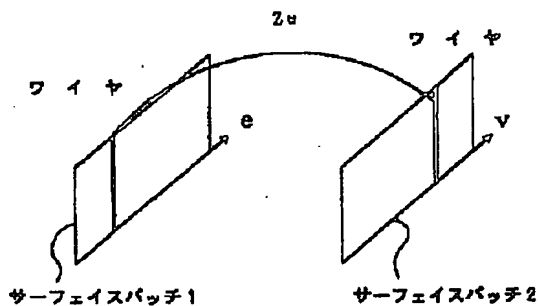
相互インピーダンス算出ルーチンの実行する処理フロー



【図10】

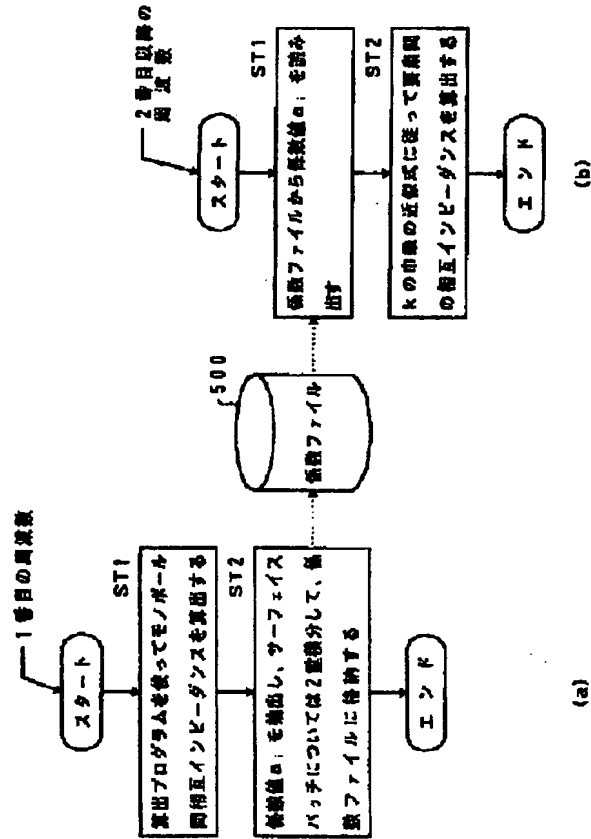
相互インピーダンスの算出説明図

$$Z_{ij} = \frac{\int \int Z_{11} dV d\phi}{e \cdot V}$$



【図7】

相互インピーダンス算出プログラムのフローチャート



**THIS PAGE BLANK (USPTO)**